



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
EN TOPOGRAFÍA, GEODESIA Y CARTOGRAFÍA**

TITULACIÓN DE INGENIERO TÉCNICO EN TOPOGRAFÍA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**CONFECCIÓN DE CARTOGRAFÍA TEMÁTICA DE COBERTURAS DEL SUELO
MEDIANTE IMÁGENES AEROTRANSPORTADAS DE ALTA RESOLUCIÓN**

Madrid, Julio de 2014

ALUMNA:

ANGANÍE BELÉN SORNOZA GRANOBLE

TUTORA:

MERCEDES FARJAS ABADÍA

COTUTOR:

JOSÉ ANTONIO DOMÍNGUEZ

AGRADECIMIENTOS:

A mi tutora Mercedes Farjas, por su apoyo incondicional y constante en todas las dudas y dificultades surgidas a lo largo de éste proyecto y por hacerlo todo tan fácil cuando yo lo veía tan complejo.

A mi cotutor José Antonio Domínguez, por su capacidad para ofrecerme información, su paciencia para enseñarme y para responder mis dudas, y su apoyo continuo en mi proceso de aprendizaje.

A mis padres, a quienes con todo mi cariño dedico éste documento; porque su confianza en mí y cariño, infinitos e incondicionales, han sido mi piedra angular. ¡Papi! ¡Mami!, aquí está nuestro resultado.

A Juana Moreno y a Santiago Sainz, porque más de la mitad de las oportunidades y de las metas conseguidas han surgido con ellos y gracias a ellos.

A mis tíos y primos, por implicarse en procurarme agradables descansos familiares y por preocuparse por mí del modo tan especial que lo hacen.

A mis amigos y amigas más cercanos, con quienes he madurado emocionalmente e intelectualmente; y cuya forma de crear nuestra sinergia estudiantil durante todos estos años fue tan clave como especial hasta el último momento.

A mi pareja, por su gran paciencia y apoyo en todos los niveles posibles que un compromiso pueda abarcar, para ayudarme a hacer mi meta realidad.

A todos los profesores que, directa e indirectamente, han contribuido en que el llegar hasta aquí sea posible.

Una especial mención de agradecimiento, a mi profesora María Luisa Casado, quien en el momento adecuado me ayudó pacientemente a luchar por ser la persona efectiva que soy. Así también, a mi profesora Rosa María García, cuyo apoyo moral incrementaba mis ganas de continuar. Y a ambas, por inculcarme de forma sobresaliente y cercana unas bases férreas con las que he podido afrontar mi carrera; y sin las cuales, francamente no lo hubiera logrado de una forma tan fluida como lo he hecho.

A todos, MUCHAS GRACIAS.



ÍNDICE

ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1. Introducción.....	7
1.2. Objetivo.....	8
2. ZONA DE ESTUDIO.....	10
2.1. Zona de estudio.....	11
2.2. Geología de la zona de estudio.....	13
3. ANTECEDENTES.....	15
3.1. Antecedentes.....	16
3.2. Datos de entrada.....	16
3.2.1. Características del material empleado.....	16
3.2.2. Imagen DAEDALUS.....	16
3.2.3. Cartografía de la zona de estudio.....	21
4. PRE - PROCESO DE DATOS.....	23
4.1. Pre - proceso de imagen.....	24
4.2. Corrección radiométrica de la imagen.....	24
4.3. Corrección de la cabecera y separación de la imagen.....	24
4.4. Corrección atmosférica.....	29
4.4.1. Corrección y modelo por QUAC.....	30
4.4.2. Corrección por FLAASH.....	31
El modelo FLAASH.....	31
4.4.3. Elección de la herramienta adecuada.....	32
4.4.4. Realización de la corrección atmosférica.....	33
4.5. Corrección geométrica.....	35
4.5.1. Descripción de la georreferenciación entregada.....	35
4.5.2. Sistema de referencia ED50.....	36
4.5.3. Sistema de referencia ETRS89.....	36
4.5.4. Transformación entre sistemas de referencia.....	37
4.5.5. Comprobación de resultados.....	43
4.6. Principales anomalías de la imagen.....	47
4.6.1. Distorsión causada por la plataforma.....	47
4.6.2. Distorsión causada por la rotación terrestre.....	48
4.6.3. Distorsión de oblicuidad.....	48
4.6.4. Distorsión panorámica.....	49
4.6.5. Distorsión causada por la esfericidad terrestre.....	49
4.6.6. Distorsión causada por efecto del relieve.....	50
4.7. Realce de imagen.....	51



	<u>Pág.</u>
5. RECORTE DE LA IMAGEN.....	53
5.1. Recorte de la imagen.....	54
5.2. Proceso operativo.....	54
5.3. Resultado.....	55
6. ANÁLISIS EXPLORATORIO.....	56
6.1. Análisis visual.....	57
6.2. Fotointerpretación de combinaciones de bandas	57
6.3. Definición de posibles clases existentes.....	64
6.4. Análisis de las curvas del valor digital de la imagen.....	67
7. CLASIFICACIÓN DE LA IMAGEN.....	70
7.1. Concepto de clasificación.....	71
7.2. Clasificación supervisada.....	71
7.2.1. Fase de entrenamiento.....	71
Análisis de las estadísticas de las clases espectrales.....	73
7.2.2. Fase de asignación.....	74
Proceso de asignación de clases.....	74
Discusión del proceso digital de ejecución.....	76
7.2.3. Fase de comprobación de resultados.....	83
Matriz de confusión.....	83
Primer resultado.....	84
Segundo resultado.....	87
Tercer resultado.....	88
Cuarto resultado.....	88
Modificación de la leyenda.....	89
7.3. Clasificación no supervisada.....	93
Discusión del proceso digital de ejecución.....	93
8. EDICIÓN CARTOGRÁFICA.....	100
8.1. Edición cartográfica temática.....	101
8.2. Resultados.....	105
9. ANEXOS.....	108
9.1. Anexo I.....	109
9.1.1. Fundamentos de teledetección.....	109
9.1.2. Sensores.....	122
9.1.3. Sensor DAEDALUS – 1268.....	125
9.2. Anexo II.....	129
9.2.1. Sobre la alta resolución espacial.....	129
10. PRESUPUESTO.....	133
10.1. Presupuesto del proyecto.....	134



	<u>Pág.</u>
Hoja de precios.....	134
Presupuesto por capítulos.....	134
Resumen general del presupuesto.....	136
11. CONCLUSIONES.....	137
11.1. Conclusiones.....	138
12. BIBLIOGRAFÍA.....	139
12.1. Bibliografía.....	140
12.2. Páginas web.....	140



1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La forma más básica y sintetizada de definir Teledetección es describirla como la técnica que permite obtener información, en contextos cualitativo y cuantitativo, de una determinada porción de superficie terrestre sin entrar en contacto con ella, detectando y grabando la energía emitida o reflejada y procesando o analizando dicha información.

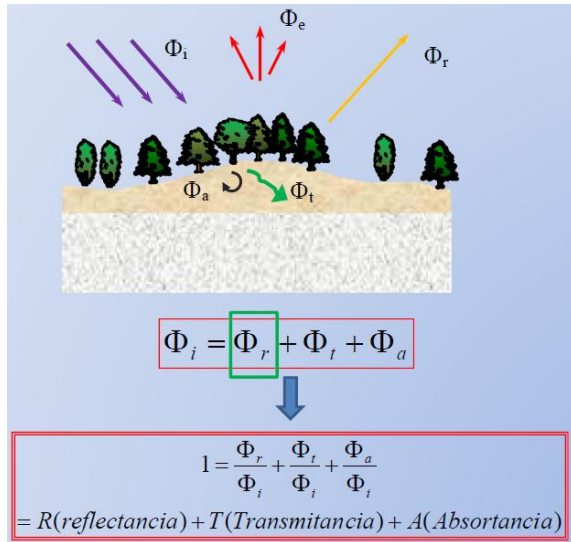


Figura 1.1 – Relación entre los flujos incidente y reflejado.

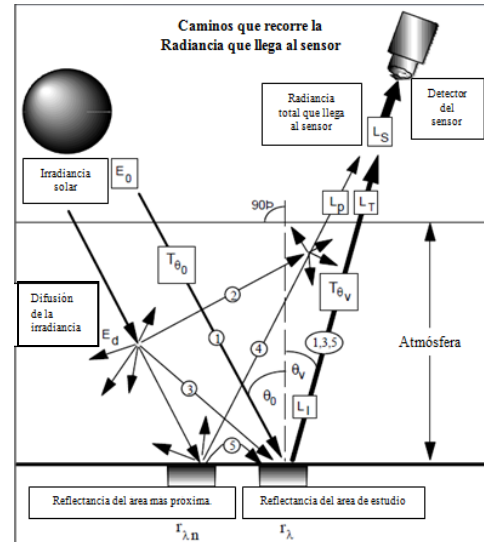


Figura 1.2 – Esquema de la recepción de energía en el sensor.

El objetivo último de esta tecnología es poder llegar a realizar la toma de decisiones a partir del análisis de los datos transmitidos a las estaciones receptoras por el sistema de comunicación, estaciones que deberán ser capaces de transferir la información adquirida por el sensor que proceda de la energía reflejada en la cubierta terrestre iluminada por el foco o fuente de energía.

Dicho sistema de comunicación será un sensor habilitado al fin anteriormente descrito, sobre un medio que le haga de soporte o plataforma con la capacidad de cubrir la zona a estudiar, y cuyo trayecto sea espacial (satélites) o aéreo (aviones, helicópteros, tripulados o no tripulados, satélites o globos).

La teledetección se utiliza en estudios relacionados con cartografía temática orientada a investigar las distintas clasificaciones del suelo, pudiendo permitir a la geología complementar las distintas ramas de investigación de la corteza terrestre desde el estudio de su parte más superficial. Así mismo, se retroalimenta con la información de aquella para las distintas zonas que requieran un estudio, tanto desde el punto de vista básico, como desde el puntual de las mismas.

La teledetección espacial ofrece ventajas frente a otras técnicas, entre las que pueden destacar (Chuvieco, 1996):

- Cobertura global y periódica de la superficie terrestre.
- Visión panorámica.
- Información sobre regiones no visibles del espectro.

La teledetección aérea también presenta ventajas, tales como:

- Precisión y control de errores.
- Rapidez
- Cartografías completas.

La teledetección aérea frente a la espacial presenta mayores costes, dependencia de las condiciones atmosféricas y/o no cobertura periódica, de modo que su uso es aplicable a casos concretos que requieran un nivel de resolución espacial destacado, descartándose su uso para grandes extensiones.

Es entendido que como rama de la ciencia, la teledetección espacial es bastante reciente y en principio, como herramienta de estudios anteriores al siglo XX referentes a la superficie del planeta, no es la más adecuada en el fin. Dentro de la misma, una rama poco conocida y más asociada a la fotogrametría por su metodología de toma de datos es la teledetección aérea conocida como aerotransportada, precedente a la espacial y que nos permite ampliar la antigüedad de registros mediante teledetección rudimentaria hasta principios de siglo, dependiendo de la zona en que busquemos. Puntualmente, en España, este período no va más lejos de los años 50.

En definitiva, la documentación referente al punto de vista global de cualquier zona de la corteza de nuestro planeta desde la geografía, la geología o el estudio del medioambiente, etc., puede obtenerse mediante fotografía aérea y la información que actualmente proporcionan las imágenes satelitales, mostrando éstas, su estado más reciente.

1.2 OBJETIVO

El objetivo del presente Proyecto Fin de Carrera es la elaboración de cartografía base de la zona Rivas - Vaciamadrid, situada al noreste de Madrid, a partir de imágenes de alta resolución espacial pancromáticas y en color obtenidas mediante teledetección aerotransportada de la zona. Se pretende poder facilitar el reconocimiento de la morfología y la geología natural de la zona desde la clasificación de la cobertura del suelo. La zona de trabajo actualmente está construida y en el momento del registro de datos se encontraba en estado natural.

La finalidad consiste en proporcionar una información temática que permita llevar a cabo estudios de análisis de cobertura y de cambios. Se trata de una imagen en alta resolución por un sensor aerotransportado, ATM (*Airbone Thematic Mapper*), de naturaleza pasiva. La imagen fue registrada en el año 1997 y contiene información clasificada en 11 bandas del espectro electromagnético.

El proyecto consta de dos partes:

1. Confección de cartografía base:
 - Documentación previa de los aspectos físicos globales (geomorfológicos, geológicos, hidrológicos) del área de estudio, a través de los documentos que puedan existir en internet con acceso libre.
 - Obtención de cartografía a escala 1/25000.
2. Confección de la cartografía temática:
 - Selección de la zona de estudio dentro de la imagen registrada y tratada en la primera parte del proyecto.
 - Clasificación de la imagen para análisis y definición de la cobertura del suelo.
 - Edición de la cartografía temática.

El resultado del proyecto es una cartografía base, a escala 1/25000, que contiene información descriptiva sobre la distinta cobertura de suelo de la zona a tratar, antes de que ésta fuera construida y/o modificada artificialmente, y cartografía temática de la zona de interés.



2 ZONA DE ESTUDIO

2.1 ZONA DE ESTUDIO

SITUACIÓN Y DESCRIPCIÓN.

La zona de estudio está situada en la Comunidad Autónoma de Madrid (CAM), sobre el término municipal de Rivas Vaciamadrid. Limita con los municipios de Mejorada del Campo al norte, San Martín de la Vega al sur, Arganda del Rey al sudeste y Madrid al noroeste. Físicamente, aquí se encuentra el río Jarama y sus lindes.

Morfológicamente, este espacio constituye una vega – Vega del Jarama –, que forma parte de una amplia cubeta que los geólogos llaman Cuenca de Madrid. En torno al lugar, se pueden encontrar sedimentos de edad mesozoica en los sustratos subyacentes, y de edad cenozoica en la cobertera.

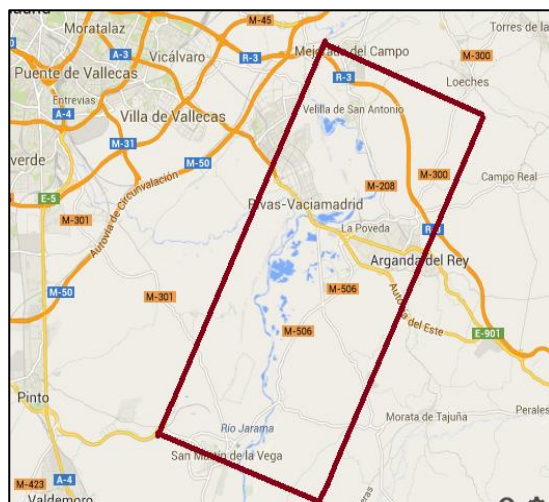


Figura 2.1 – Ubicación de la zona dentro de la CAM.



Figura 2.2 – Fotografía panorámica de la Vega del Jarama.

Desde la década de los 50 hasta hace relativamente poco, se han localizado en la Vega del Jarama una serie de lagunas ligadas directamente a la minería de cielo abierto. La extracción de arena y grava en la zona alrededor del río Jarama fue aumentando a partir de los años 50 (muy especialmente en el último cuarto del siglo XX). Dado que ese aumento se produjo sin llevar a cabo ninguna planificación ni control, provocó el deterioro del medio. La administración tuvo que encargarse de la protección y conservación de este paraje, y en 1994 la consolidó mediante la creación de un espacio protegido denominado “Parque Regional en torno a los ejes de los cursos bajos de los ríos Manzanares y Jarama” o “Parque Regional Del Sureste”.

El municipio de Rivas incorporó en 1845 Vaciamadrid, entidad perteneciente a la Villa de Vallecas, bajo el nombre “Ribas (o Rivas) de Jarama”. Ambos pueblos eran pequeños, con población muy dispersa. Quedaron destruidos durante la Guerra Civil Española por encontrarse

en el frente y fueron reconstruidos en 1954 por la Dirección General de Regiones Devastadas como un solo núcleo, cambiando el nombre de Ribas de Jarama por el actual.

En los años 60, la explotación de áridos deformó artificialmente el entorno paisajístico del sector. Una de las consecuencias de la explotación minera fue la aparición de lagunas residuales o de graveras, que surgen cuando la explotación de áridos a cielo abierto llega al nivel freático. Por entonces, las lagunas eran muy dinámicas, debido a que se encontraban en zonas de constante cambio a causa de la explotación. Finalizada la extracción, las dimensiones de la laguna permanecen constantes, tras no haber una nueva actividad humana que las modifique.



Figura 2.3 – Laguna de Campillo. Parque Regional Del Sureste.

A partir de los años 80, comenzaron a construirse urbanizaciones a 4 km del pueblo, en dirección a Madrid. Pronto este nuevo núcleo, que pasó a llamarse *Rivas-Urbanizaciones*, tuvo más población que el casco histórico.

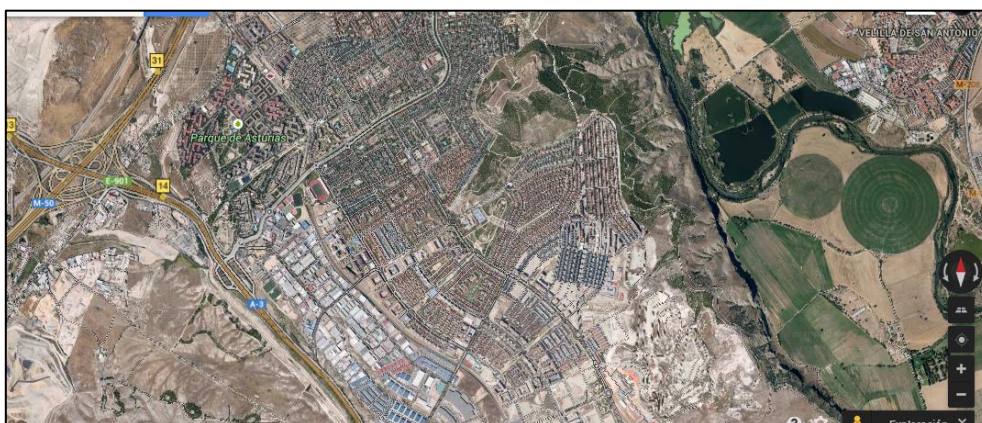


Figura 2.4 – Urbanismo desarrollado en una zona de Rivas Vaciamadrid.

Desde entonces, el planeamiento urbanístico ha estado encaminado a unir los dos núcleos. Se está consiguiendo debido al exponencial crecimiento poblacional de este municipio. Las primeras urbanizaciones fueron las conocidas como Pablo Iglesias (viviendas tipo dúplex) y *Covibar* (Cooperativa Obrera de Viviendas Baratas). Posteriormente, buena parte del crecimiento se ha basado en viviendas unifamiliares.

Respecto a transportes ferroviarios, el término municipal fue atravesado por el antiguo ferrocarril de vía estrecha de Madrid a Arganda, más tarde llamado *Ferrocarril del Tajuña*. Gran parte de su línea ha sido aprovechada para el tramo de la línea 9 del Metro de Madrid, que lleva hasta Arganda del Rey. Actualmente, un ferrocarril turístico circula en un tramo de cerca de tres kilómetros, del antiguo *Ferrocarril del Tajuña*, desde Laguna del Campillo (de Rivas-Vaciamadrid) hasta la antigua estación de La Poveda (de Arganda del Rey). Gran parte del recorrido discurre por el término municipal de Rivas-Vaciamadrid, bordeando la laguna y marchando al pie de los cantiles yesíferos, hasta llegar al puente ferroviario sobre el río Jarama.

Una locomotora de vapor del año 1925, encabeza el tren turístico. Respecto a comunicaciones viales, se empiezan a construir sobre la zona desde 1960. La última obra lineal se acaba a principios de éste siglo.

Actualmente, la zona presenta variedad de ecosistemas con destacados valores ambientales, entre los que figuran especialmente los humedales, en su inmensa mayoría, de origen artificial. Del conjunto de hábitats artificiales, el 96,5% corresponden a láminas de agua generadas por actividades extractivas (una yesera y 110 explotaciones de grava y/o arenas) apareciendo en el 3,5% restante dos presas, una balsa de riego y un pozo. En lo concerniente a los ecosistemas naturales, siete de ellos son charcas asociadas a manantiales, existiendo además una laguna marginal (Roblas y García-Avilés, 1997).

La propia naturaleza de la actividad generada por la extracción de áridos en las graveras implica la eliminación de la cubierta vegetal original. No obstante, a consecuencia de la aparición de las lagunas y por proximidad al curso fluvial, se desarrolla una vegetación que ha podido alcanzar mayor o menor grado de desarrollo. Es común la presencia de repoblaciones con diversas especies (tanto autóctonas, como exóticas) en las graveras restauradas, ligadas a una fauna diversa.

2.2 GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

España es un país de gran interés desde el punto de vista geológico puesto que, en consecuencia de su clima mediterráneo, su pasado tectónico, y su creciente desarrollo en infraestructuras, ofrece amplios paisajes en los que aparecen interesantes afloramientos para el estudio de su geología. Por consecuencia, comprende una amplia gama de estructuras rocosas que varían desde el Proterozoico hasta el reciente Cenozoico y la actualidad, y sistemas tectónicos muy variados: cuencas sedimentarias, roturas de continentes, apertura de mares, importantes episodios orogénicos, etc.

En concreto, la zona de estudio pertenece a la unidad geológica de cuencas sedimentarias cenozoicas. Dentro del territorio de la CAM, Rivas – Vaciamadrid se encuentra localizada sobre terrenos generados en el Cuaternario, tanto en el Pleistoceno, como en el Holoceno, y está ligada sistemas fluviales del Manzanares y del Jarama.

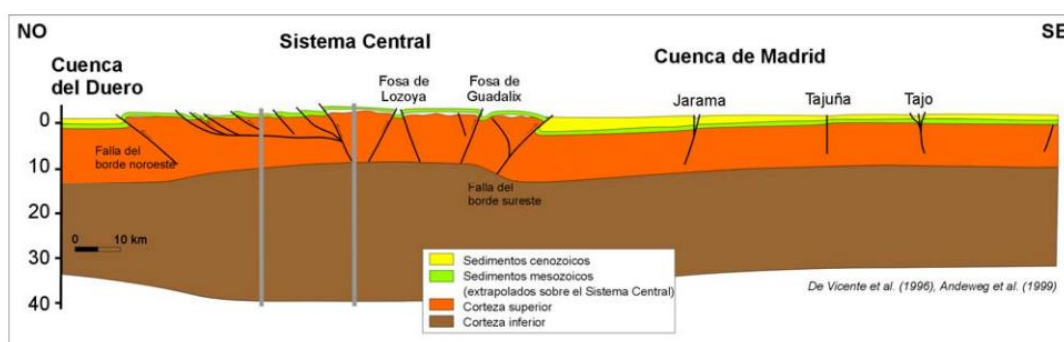


Figura 2.5 – Perfil geológico de la CAM donde aparece la Cuenca de Madrid.

Las facies que aparecen son niveles de terraza, llanuras de inundación y abanicos fluviales y coluviales. Los materiales predominantes en el medio son arenas, gravas y limos (sin matriz

arcillosa) en el caso del cauce aluvial, de la llanura de inundación y del sistema de terrazas bajas; gravas, arenas y limos (con matriz arcillo-arenosa) en las terrazas medias; y conglomerados y gravas en las altas.

Desde el punto de vista fisiográfico del sustrato, esta vega fluvial se originó como consecuencia de la acción erosiva de los ríos Manzanares y Jarama en los relieves del Sistema Central (Somosierra y Guadarrama), y el posterior depósito de los derrumbes de los valles de los citados ríos.

La vega está situada en la subcuenca del Jarama, que a su vez pertenece a la cuenca hidrográfica del Tago y, en un ámbito más global, a la cuenca de Madrid.



3. ANTECEDENTES

3.1 ANTECEDENTES

Teledetección es una ciencia cuya metodología opera adquiriendo datos de información a distancia, sin contacto con el objeto estudiado. Aprovechando el potencial espacial, espectral, temporal y radiométrico de ésta, el eje principal de este trabajo es el análisis gráfico - mediante un mapa - del estado en el que quedaron los suelos tras la explotación y su posterior edificación.

Podemos distinguir dos fases en el proceso general del procesamiento de datos en teledetección: la captura de datos del sensor y su análisis o interpretación.

- La fase de captura se origina con el flujo energético emitido a partir de una fuente, que recorre la atmósfera interactuando con ella y llegando a la superficie terrestre donde sufre, entre otros procesos, una reflexión que hará que éste flujo sea recogido por el sensor, codificado, grabado y enviado al sistema de recepción.
- En la fase de interpretación, con los datos digitales proporcionados por el sensor, se realiza una interpretación visual de éstos y un tratamiento digital de los mismos. Estos procedimientos se describirán en los capítulos del presente PFC. Los fundamentos teóricos en los que están basados para la realización del proyecto, se citan en el Anexo I – Fundamentos –.

3.2 DATOS DE ENTRADA

3.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL EMPLEADO

Como *input* necesario para la ejecución del proyecto, se ha empleado el siguiente material:

- Una imagen aerotransportada del sensor DAEDALUS [DS – 1268], registrada en 11 bandas de las 12 totales que tiene el sensor. No tiene identificador, dado que fue planificada en todos sus parámetros, tanto en características del sensor que la registró, como del vuelo desde el que se hizo.
- El software ERDAS IMAGINE, en la versión 2011.
- El software ENVI, en la versión 4.8.
- Parámetros de escenas TM del sensor LANDSAT – 5, que servirán para la configuración y comparación de los parámetros de la imagen DAEDALUS.

3.2.2 IMAGEN DAEDALUS

En el año 1997 se realizó un vuelo sobre la zona de interés con el sensor multispectral DAEDALUS – 1268 [DS – 1268], capaz de registrar imágenes de alta resolución espacial (por entonces, muy alta resolución espacial). La imagen se registró con el sensor instalado en un avión CASA 212, bajo los siguientes parámetros:

- Altura de vuelo = 1376 m
- Ancho de imagen = 2.5 Km
- Ancho del marco de la imagen en columnas = 4401 píxeles

- Ancho del marco de la imagen en filas = 3499 píxeles
- Resolución espacial = 3.44 m
- Resolución radiométrica = 8 bits
- Resolución espectral del sensor = 12 bandas. Para el proyecto se cuenta con 11.
- Fecha del vuelo: 29 de octubre de 1997
- Intervalo horario de adquisición de la escena = 12 – 15:30 horas.
- Tratamientos incorporados: Distorsión panorámica y corrección geométrica.
- Elevación solar cercana a 40° sexagesimales en el momento de la toma de datos.
- Sistema de barrido: *Scanning Detectors*.
- CC de la escena = 0%
- Proyección = UTM - huso 30, hemisferio Norte -.
- Módulo de deformación lineal para distancias UTM en la zona de estudio = 0.9996
- Sistema de referencia: European Datum 1950 – ED50-.
- Elipsoide asociado = Internacional 1924. Parámetros: $a = 6378388$ m, $1/f=297$.
- Tamaño de la imagen = 169.39 MB
- Formato y extensión de archivo: Formato “BSQ”, con extensión desconocida admisible por ENVI. Formato IMG y extensión “.img” para ERDAS.

El proyecto de vuelo quedó establecido como se muestra de forma gráfica en la figura 3.1.

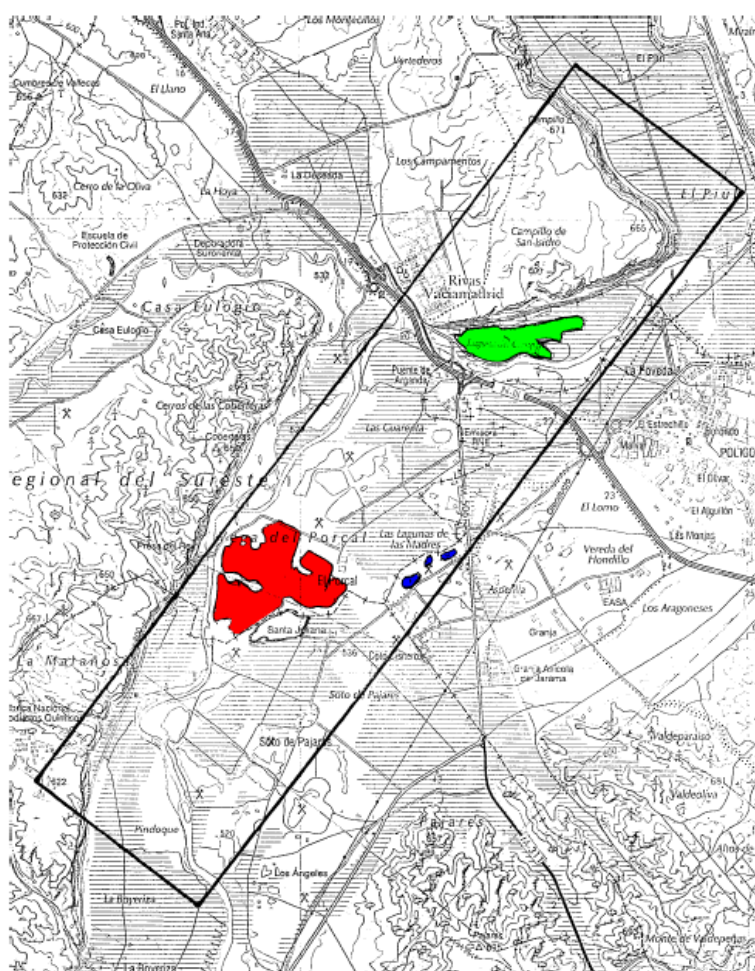


Figura 3.1 – Boceto del proyecto de vuelo para la toma de la imagen. (J. A. Domínguez, 1998).

En la cabecera asociada a la imagen - figura 3.2 -, se pueden leer los metadatos de la imagen.

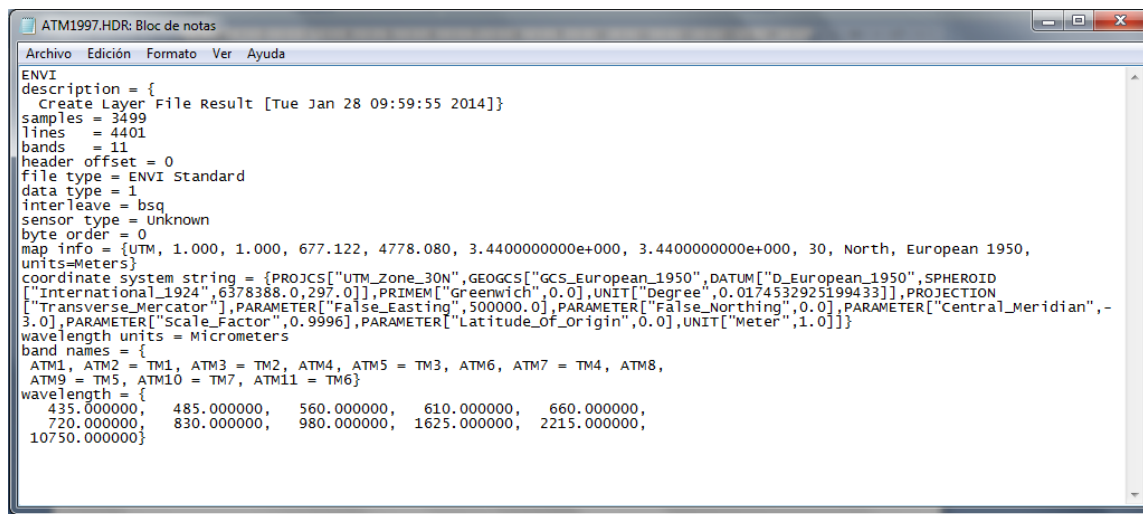


Figura 3.2 – Cabecera con los parámetros de la imagen ATM.

Las bandas del sensor DS – 1268 se han configurado de forma idéntica a las del sensor *Thematic Mapper* [TM] de la plataforma LANDSAT – 5 (configuración ATM): Dado que se dispone de extensa documentación - archivada y actualizada - sobre las plataformas LANDSAT, y desarrollos cartográficos realizados a partir de las escenas de estas plataformas comprendidos dentro del marco político del país, obtendremos soluciones efectivas si fuera necesario aplicar algoritmos o trabajos basándolos en ésta configuración. De las once bandas, siete tienen configuración equivalente a las del LANDSAT – 5.

El sensor DS – 1268, tiene un registro del espectro electromagnético más amplio que el de sensores satelitales como LANDSAT. El registro por bandas para el rango visible es: ATM1 = violeta (V), ATM2 = azul (B), ATM 3 = verde (G), ATM4 = ATM5 = rojo (R). Y el registro para el rango infrarrojo es: ATM6 = ATM7 = ATM 8 = infrarrojo cercano (NIR), ATM9 = ATM10 = infrarrojo medio (SWIR) y ATM11 = infrarrojo térmico (TIR). En la figura 3.3 se muestra la distribución de las 10 primeras bandas. En la cabecera, por cada intervalo de longitudes de onda que comprende cada banda, se ha establecido el valor central del intervalo (las unidades son nm, más adelante corregiremos la configuración establecida como μm).

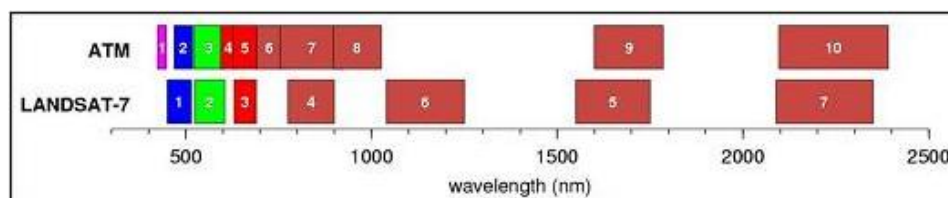


Figura 3.3 – Bandas del DS – 1268 comparadas con las del TM – 7.

En la figura 3.4, se muestran en nm los rangos de longitudes de onda para las cuales están configuradas las distintas bandas, asociadas a canales del mismo nombre, de la escena ATM de DAEDALUS el día en que ésta se registra. La única banda que no se utilizará es la ATM11, dado que es una banda térmica que proporciona información de la temperatura para la que se aplican esos parámetros y es una información redundante para el objetivo del proyecto.

Para establecer la equivalencia entre bandas, tomamos cada intervalo de longitudes de onda que concierne a cada banda de una escena TM, procedemos de forma análoga con una imagen ATM y establecemos la comparativa de bandas entre el par de sensores, viendo las que son iguales o si una banda de un sensor abarca un rango mayor que su homóloga del otro sensor.

Canal	λ min. (nm)	λ max. (nm)
1	420	450
2	450	520
3	520	600
4	600	620
5	630	690
6	690	750
7	760	900
8	910	1050
9	1550	1750
10	2080	2350
11	8500	13000
12	8500	13000

Figura 3.4 - Tabla de configuración de bandas del sensor DAEDALUS el día de la toma de datos.

En la figura 3.5 se muestra los rangos de longitudes de onda (en μm), para las que están configuradas las bandas de un sensor TM – LANDSAT que registrase una escena sobre la zona.

Landsat 5 (TM sensor)	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Band 1	0.45 - 0.52	30
Band 2	0.52 - 0.60	30
Band 3	0.63 - 0.69	30
Band 4	0.76 - 0.90	30
Band 5	1.55 - 1.75	30
Band 6	10.40 - 12.50	120
Band 7	2.08 - 2.35	30

Figura 3.5 – Tabla de configuración de bandas en el sensor TM.

En la figura 3.6 se hace la comparativa entre las bandas de ambos sensores, además de los valores centrales de longitud de onda de cada banda, reflejando la equivalencia final entre ellas que se ha especificado en la cabecera de la imagen ATM.

Banda ATM	λ min. (nm)	λ central (nm)	λ máx (nm)	Banda TM
1	420	435	450	
2	450	485	520	1
3	520	560	600	2
4	600	610	620	
5	630	660	690	3
6	690	720	750	
7	760	830	900	4
8	910	980	1050	
9	1550	1650	1750	5
10	2080	2215	2350	7
11	8500	10750	13000	
	10400	11450	12500	6
12	8500	10750	13000	

Figura 3.6 – Equivalencia entre bandas ATM – TM.

El sistema de vuelo – figura 3.7 -, tenía en el momento del vuelo un DGPS para tomar datos de posición en el momento de la adquisición, cuya posición respecto al sensor ya estaba predeterminada, de modo que la escena no tendría offset; constaba además de un sistema inercial PAV – 10 para corregir deriva y cabeceo del avión que se montó bajo la cabeza del sensor. El alabeo se corrige en el momento de la toma de datos mediante un giróscopo (que no aparece en la imagen).



Figura 3.7 – Interior del Aviocar CASA – 212 – 200 el día del vuelo.

Los campos de visión digitalizados que se muestran en la figura 3.8 son el máximo y el mínimo IFOV correspondientes a las dos posibles configuraciones hardware que ofrece el instrumento. Partiendo de haberse elegido el IFOV máximo y una altura de vuelo específica, se definió el valor de 3.44 m en el terreno por lado del píxel cuadrado, traduciéndose en tamaño de barrido en terreno de 2463,04 m de ancho.

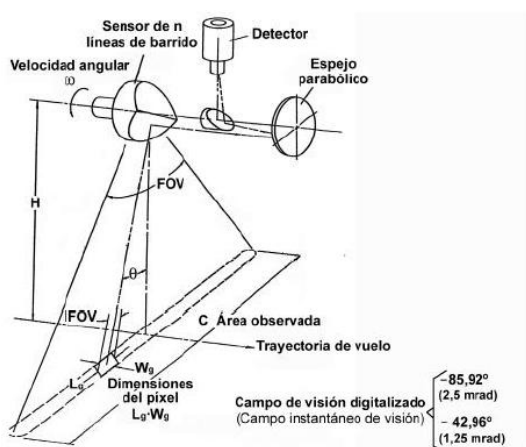


Figura 3.8 – Esquema simple de la instrumentación del sensor de barrido multiespectral DS – 1268 (Gutiérrez, 1994).



Figura 3.9 - Cabeza del sensor DS – 1268.

La imagen se incluye en el PFC en soporte digital, en versiones con extensiones admisibles por los dos software utilizados. Contiene la cabecera con información de las 11 bandas operativas de las 12 totales que tiene el sensor, de los parámetros aéreos del aviocar y de los parámetros de las correcciones con las que se entregó, adherida en los metadatos. También se incluye información e imágenes resultantes del trabajo de pre-proceso realizado, en formato correspondiente al software con el que se haya realizado cada imagen.

En la figura 3.10 se muestra una vista completa de la imagen adquirida, originalmente proporcionada.



Figura 3.10 – Escena de la zona de estudio en color verdadero.

3.2.3 CARTOGRAFÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para una mayor definición de la zona de estudio asentada en la vega del Jarama, se dispone de cuatro mapas ráster descargados en formato TIFF, desde la página del Instituto Geográfico Nacional, a escala 1/25000. Cada hoja es un cuadrante de su homóloga a escala 1/50000 - serie

MTN25 - y la zona se sitúa en la conjunción de cuatro bordes (uno por cada hoja), quedando ordenadas como se muestra.

Nº 0559 – C4	Nº 0560 – C3
Nº 0582 – C2	Nº 0583 – C1

La actualización más reciente de los mapas es de abril de 2013, aportan información sobre el estado de la zona a día de hoy, modificada natural y artificialmente.

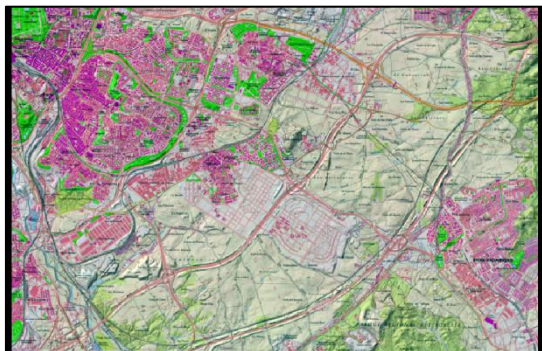


Figura 3.11 – Visualización en ERDAS de la hoja 0559 – C4.

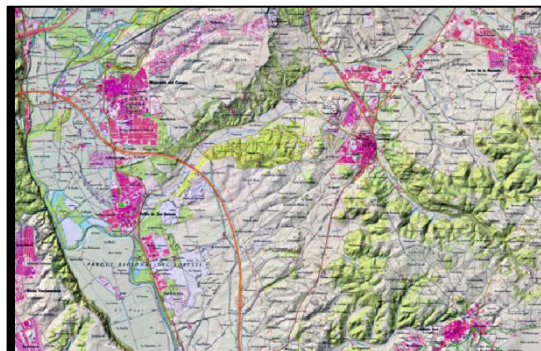


Figura 3.12 – Visualización en ERDAS de la hoja 0560 – C3.

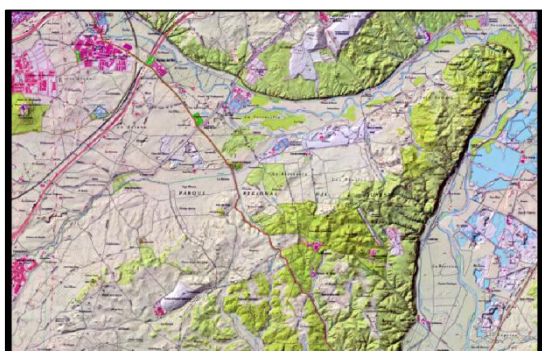


Figura 3.13 – Visualización en ERDAS de la hoja 0582 – C2.

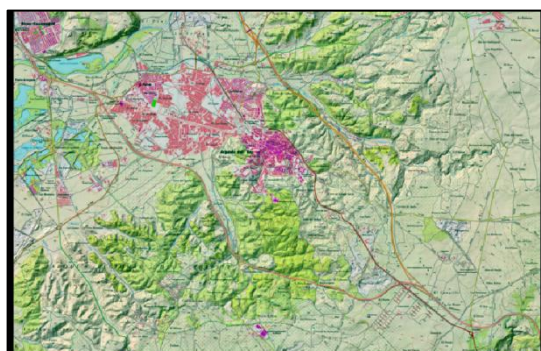


Figura 3.14 – Visualización en ERDAS de la hoja 0583 – C1.



4. PRE – PROCESO DE DATOS

4.1 PRE – PROCESO DE IMAGEN

Parte de la fase pre-proceso correspondiente al tratamiento digital de las imágenes, se realizó directamente por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial – INTA – a partir de los datos originales registrados por el sensor DS – 1268. A continuación se procede a realizar las comprobaciones de los datos y las correcciones necesarias.

El trabajo pre – proceso y sus correspondientes modelaciones matemáticas que suponen la corrección por distorsión panorámica y la corrección por cobertura nubosa, ambas introducidas a la imagen ATM en el proyecto, se ha hecho desde el INTA, y la imagen se entregó por medio del cotutor con corrección por georreferenciación y remuestreo.

4.2 CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA DE LA IMAGEN

Para el tratamiento correspondiente a píxeles y líneas perdidas y la prevención de posibles deformaciones espectrales por bandeado, se hizo una calibración previa y una comprobación inicial del sensor en el INTA, antes de realizar el vuelo. En este PFC se revisó la imagen desde el programa ENVI a partir de varios de perfiles espectrales conjugando bandas y se encontró que la corrección era válida.

4.3 CORRECCIÓN DE LA CABECERA Y SEPARACIÓN DE LA IMAGEN

Para este apartado se utiliza el programa ENVI, que admite el formato original de la imagen.

Como se verificó en la revisión de la cabecera de la imagen, había un error en las unidades de las longitudes de onda, configuradas en μm cuando los valores son de nm. Por tanto, es necesario editar el cabecero previamente.

Los pasos de edición de la cabecera y las descripciones de lo que va apareciendo tras cada operación se describen a continuación:

- Se abre la escena desde la barra de herramientas: Pestaña “File”. Botón “Open Image File” y se toma el archivo desde la carpeta de trabajo – figura 4.1 –. Se abre el archivo.
- Aparece la ventana “Available Bands List”, con metadatos de las bandas de la imagen, y abrimos la imagen en color verdadero. ENVI ofrece 3 vistas por ventanas para trabajar con la escena:
 - La ventana “Scroll”, con la vista de la escena total y un cuadro rojo de centrado grosero para cualquier posición deseada.
 - La ventana “#1” con la ampliación del cuadro rojo desde “Scroll”. A su vez, ésta ventana también tiene un cuadro rojo de ampliación de escena. El número pertenece al *Display* que se ha hecho desde la ventana “Available Bands List”.
 - La ventana “Zoom [4x]”, que muestra la ampliación del cuadro rojo desde “#1”. Dentro, se puede variar el aumento de zoom según se requiera.

En la figura 4.2 se muestra una visión general de la imagen original desde el programa ENVI.

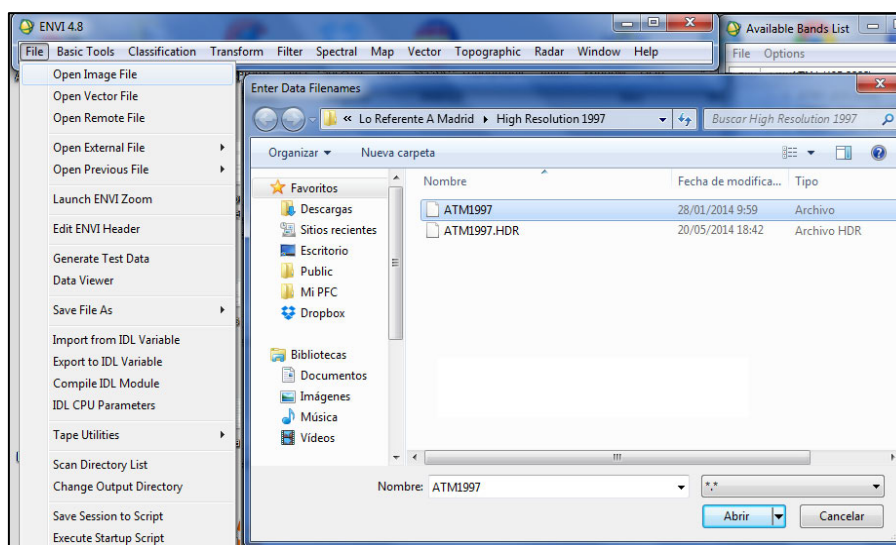


Figura 4.1 – Apertura y formato de archivo en ENVI.

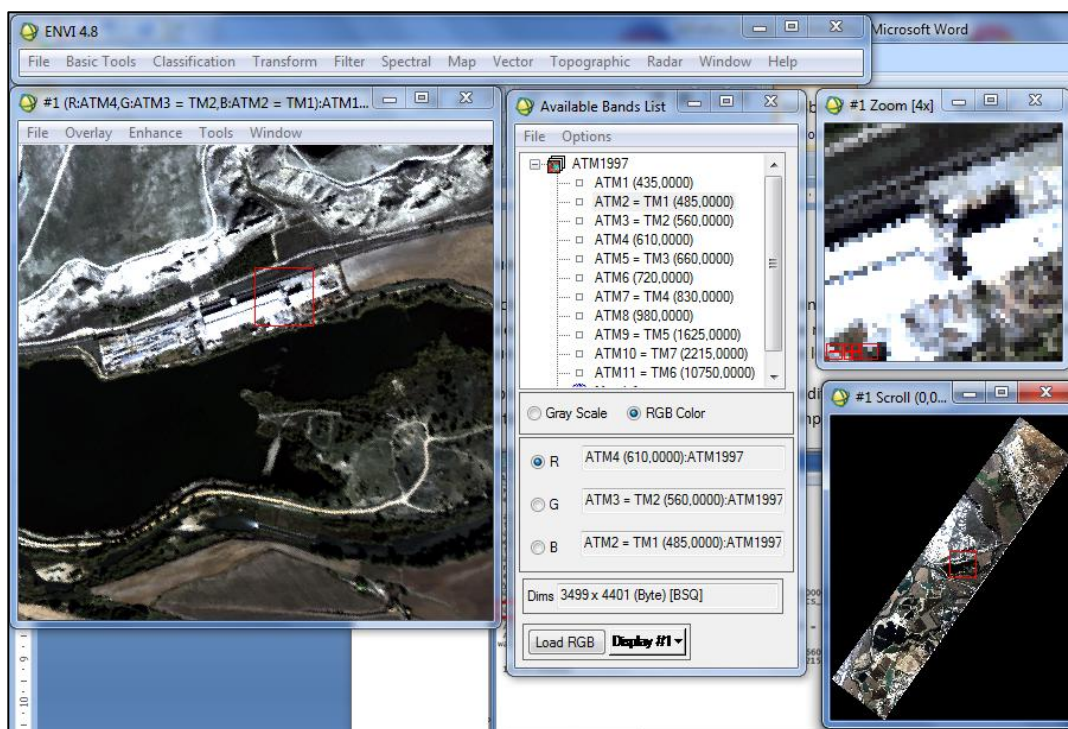


Figura 4.2 – Ventanas y visualización de imagen.

- Figura 4.3: Pestaña “File”. Botón “Edit ENVI Header”. Aparecerá el cuadro de diálogo “Edit Header Input File” de elección del archivo de entrada, con la imagen actual abierta. Se pulsa sobre la imagen y sobre el botón “Ok”.

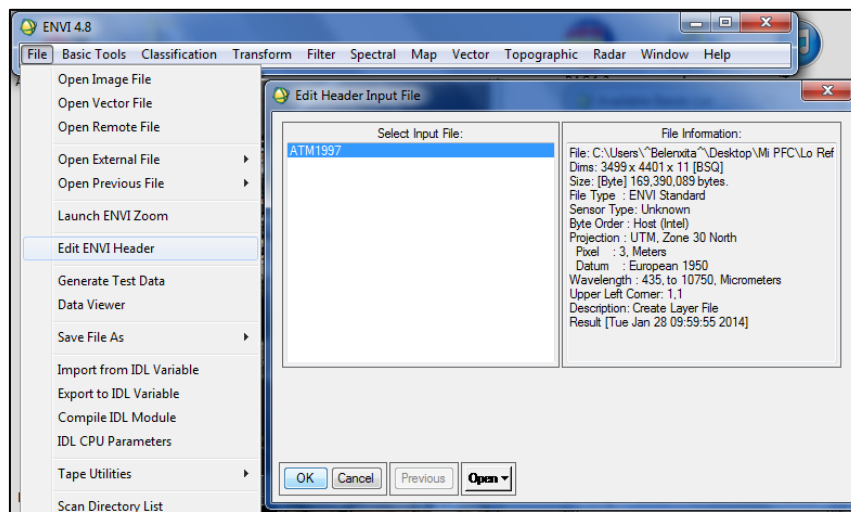


Figura 4.3 – Cuadro de diálogo de elección del archivo para la edición de la cabecera.

- A continuación, aparece el cuadro de diálogo “Header Info” – figura 4.4 – para la modificación de parámetros. Se pulsa sobre el desplegable “Edit Attributes” y sobre el comando “Wavelengths...”.
- Se abre el cuadro de diálogo “Edit Wavelength Values” – figura 4.5 – para modificación de longitudes de onda. En el desplegable “Edit Wavelength/FWHM Units” se selecciona nm. Este paso se podría utilizar más adelante si lo requiere el desarrollo del proyecto.

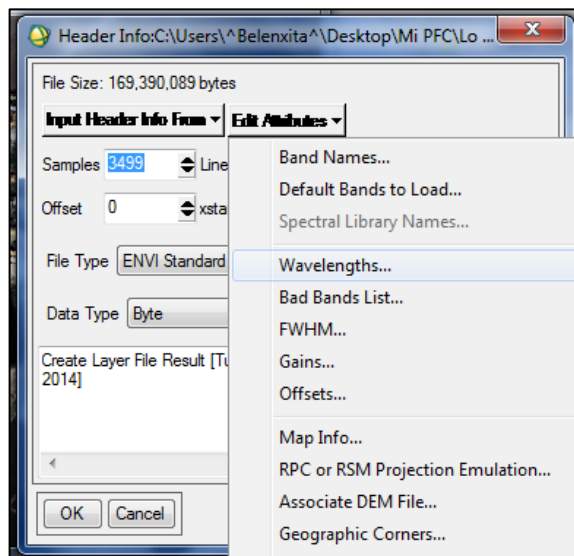


Figura 4.4 – Cuadro de diálogo de edición de la cabecera.

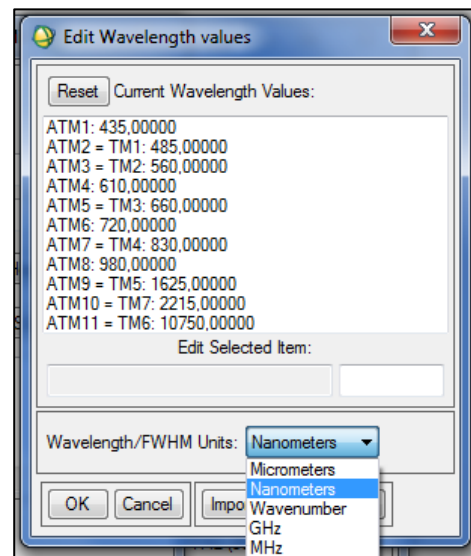


Figura 4.5 – Cuadro de diálogo para edición de las longitudes de onda.

Dado que no se va a utilizar la banda ATM 11 de la imagen, el paso previo a la siguiente corrección es formar un nuevo archivo con las 10 primeras bandas de la imagen y trabajar con este nuevo archivo.

- Figura 4.6: En la pestaña “Basic Tools” de la barra de herramientas, seleccionamos el comando “Layer Stacking”. A continuación, se abre el cuadro de parámetros. Se pulsa la

opción “Import File” y se abre el cuadro de diálogo con la imagen y sus parámetros de entrada. Se pulsa el botón “Spectral Subset” del cuadro de diálogo.

- Figura 4.7: El programa abre el cuadro “File Spectral Subset” con las bandas a elegir. Se seleccionan todas las bandas menos la ATM11. Se pulsa botón “Ok” en éste y en el cuadro de diálogo “Layer Stacking Input File”, para el que habrá aparecido [10/11] bandas en el texto asociado al botón “Spectral Subset”.

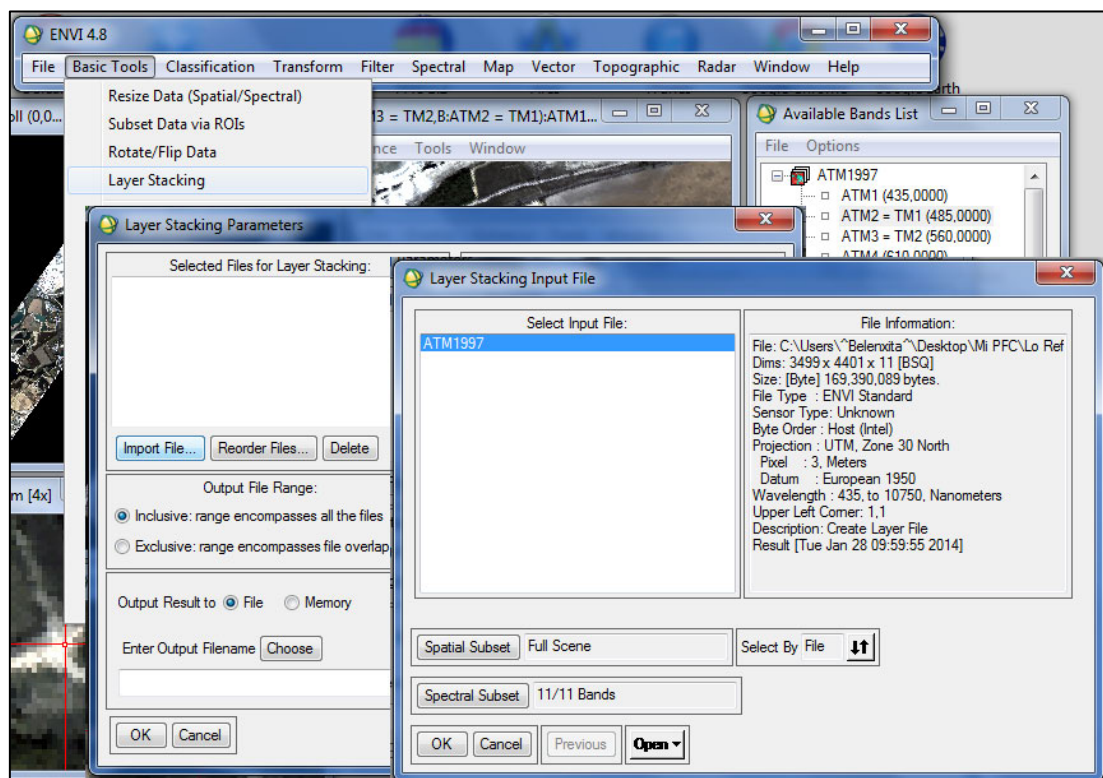


Figura 4.6 – Opción “Layer Stacking” de separación de imágenes.

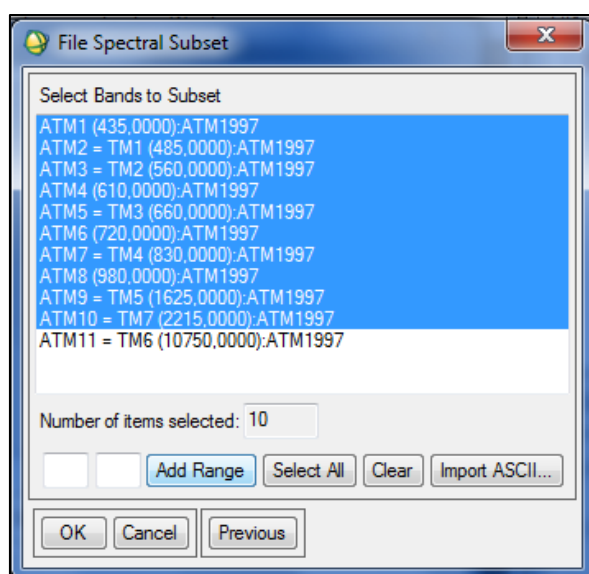


Figura 4.7 – Cuadro de diálogo con las bandas seleccionadas en la separación.

- En el cuadro de diálogo “Layer Stacking Parameters”, se pulsa el botón “Choose” y se guarda el archivo en la misma carpeta donde está ubicado el archivo original. El nuevo archivo con los resultados incluye su cabecera HDR adjunta con los parámetros de la *nueva* imagen. Se ha nombrado al nuevo archivo “ATM1997_10”.

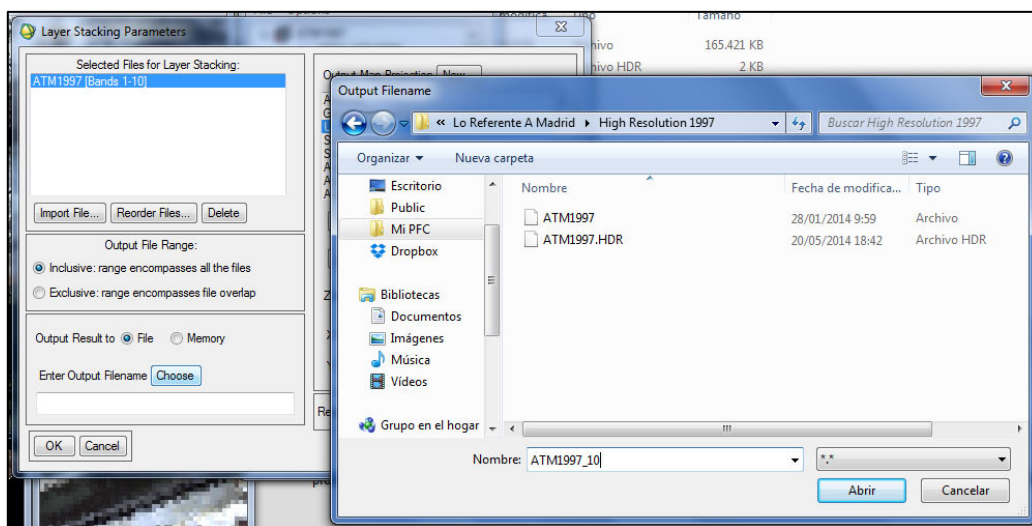


Figura 4.8 – Ruta de salida y nombre del archivo resultante.

- En la figura 4.9 se muestran las opciones elegidas y el cuadro de diálogo final. Se ha ordenado que la proyección de salida sea UTM, sobre el sistema de referencia ED50 y unidades en metros, tamaño de píxel de 3.44 m y los demás parámetros por defecto.

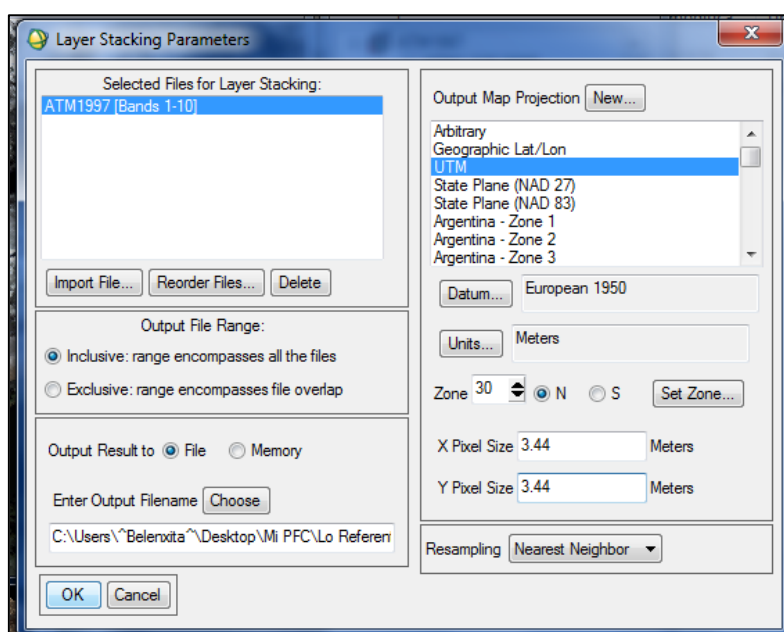


Figura 4.8 – Cuadro de diálogo “Layer Stacking Parameters” final.

- Botón “Ok”. La nueva imagen, tarda en crearse en torno a 1 minuto. Al abrirla, se aprecian en el cuadro de diálogo “Available Bands List” sus 10 bandas – figura 4.10 –. El tamaño que ocupa es de 153.99 MB.

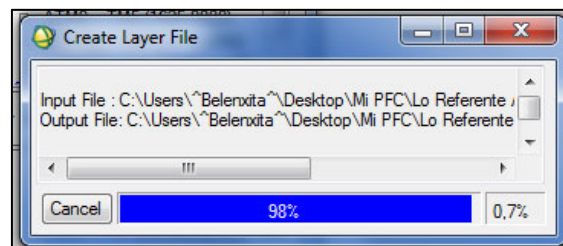


Figura 4.9 – Informe de ejecución de la separación.

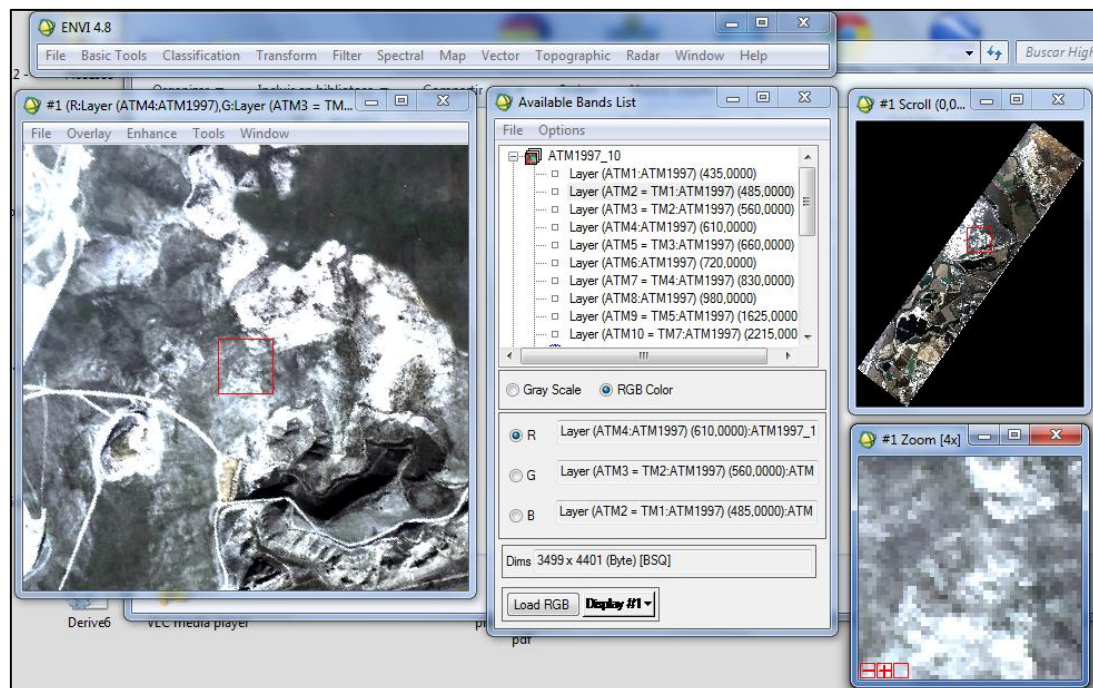


Figura 4.10 – Bandas de la nueva imagen de trabajo.

4.4 CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

La naturaleza de la teledetección requiere que la radiación solar atraviese la atmósfera antes de ser recolectada por el sensor. En consecuencia, las imágenes de teledetección incluyen información sobre la atmósfera además de la referente a la superficie terrestre. Para análisis cuantitativos de la reflectancia en la superficie, es un importante paso del pre – proceso en una imagen o escena eliminar la influencia de la atmósfera.

Para compensar los efectos atmosféricos, deben ser conocidas propiedades como las cantidades de cúmulos de vapor de agua, de distribución de los aerosoles y de visibilidad de la escena. Las medidas directas de estas propiedades raramente están disponibles, pero hay técnicas que permiten deducir su forma de impresión en los datos de radiación. Por ello, son utilizadas para desarrollar modelos altamente precisos de transferencia atmosférica de radiación, produciendo una estimación de la verdadera superficie reflectante. Además, las correcciones atmosféricas son aplicadas en una base “píxel a píxel”, debido a que cada píxel de una imagen multispectral o hiperespectral contiene una medida independiente de bandas con absorción de vapor de agua atmosférico.

El programa ENVI dispone de un módulo de corrección atmosférica que ofrece dos herramientas de modelos de corrección atmosféricos para recuperar la reflectancia espectral de imágenes multiespectrales e hiperespectrales y compensar con precisión los efectos atmosféricos. Estas dos herramientas son Quick Atmospheric Correction (QUAC) y Fast Line - of - Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH). A continuación se explica brevemente la forma de operar de cada una de ellas, la elección entre ambas y el uso y resultado.

4.4.1 CORRECCIÓN Y MODELO POR QUAC

QUAC abarca la corrección atmosférica, para imágenes multiespectrales e hiperespectrales, sobre bandas que registran rangos del espectro desde el VNIR hasta SWIR. Opera determinando los parámetros de compensación atmosférica directamente *desde* la información contenida dentro de la escena (espectros de píxel observados), sin información auxiliar, y aporta una aproximación atmosférica mayor que los métodos básicos con base física, generalmente produciendo espectros de reflectancia dentro de aproximadamente $\pm 15\%$ respecto a los físicos de entrada.

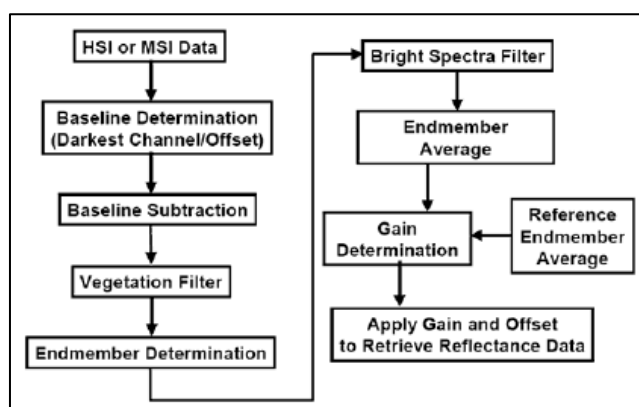


Figura 4.11 – Esquema del modelo de procesado de datos en QUAC.

QUAC está basado en el valor empírico de la reflectancia media de una muestra de diversos espectros de materia, que se conoce como el *espectro característico puro en una escena* y que es esencialmente independiente de la escena.

La herramienta permite la recuperación de precisión de reflectancia espectral razonable para cualquier visual o ángulo de elevación solar, aún no teniendo el sensor una apropiada calibración radiométrica o de longitud de onda, o con intensidad de iluminación desconocida (que es el caso de una cobertura nubosa existente en la imagen).

QUAC aporta como resultados:

- Corrección atmosférica automática de datos MSI y HSI en la región espectral de reflexión solar (0.4 – 2.5 micras).
- Soporte para sensores multiespectrales e hiperespectrales, comunes o desconocidos.

4.4.2 CORRECCIÓN POR FLAASH

FLAASH es una herramienta básica de corrección atmosférica que corrige longitudes de ondas en los rangos de espectro visible, SWIR y NIR, éste último sobre las 3 micras. También admite regiones TIR, bajo indicaciones particulares. Incluye los siguientes complementos:

- Corrección para el efecto de superposición – o adyacencia - (mezcla espacial de radiancia entre píxeles contiguos causada por la dispersión atmosférica o la radiancia sobre la superficie).
- Una opción para calcular una visibilidad de escena promedio (cantidad de aerosol/neblina). FLAASH utiliza las técnicas más avanzadas para manejo en particular de acentuadas condiciones atmosféricas, como las de presencias de nubes.
- Mapa de clasificación de nubes tenues y opacas.
- Polución espectral ajustable para supresión de objeto. Es decir, aplicación de un refinado por transformación lineal uniforme, estimación de la reflectancia que hay en una imagen y suavizado del resultado de la imagen secuencial.

FLAASH admite sensores hiperspectrales y sensores multiespectrales comunes. Las retribuciones por capas del vapor de agua y del aerosol son posibles únicamente cuando la imagen contiene bandas posicionadas en definidas longitudes de ondas. Puede corregir imágenes registradas en cualquier vertical (nadir) o con geometría de visión oblicua.

EL MODELO FLAASH

FLAASH utiliza una ecuación estándar para la radiancia espectral del píxel del sensor [L], que se aplica al rango de longitudes de onda VNIR (la emisión TIR queda descartada) y plana, sobre materiales lambertianos y equivalentes. La ecuación – figura 4.12 – es:

$$L = \left(\frac{A\rho}{1 - \rho_e S} \right) + \left(\frac{B\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_a \quad (1)$$

Figura 4.12 – Ecuación de radiancia de píxel que utiliza FLAASH.

Donde:

- ρ es la reflectancia de superficie del píxel.
- ρ_e es una reflectancia media de superficie del píxel y de su entorno cercano.
- S es la reflectancia radial de la atmósfera.
- L_a , es la radiancia tras ser dispersa por la atmósfera.
- A y B son coeficientes que dependen de condiciones atmosféricas y geométricas, pero no sobre la superficie.

Cada variable depende de la banda. El índice de longitud de onda se ha omitido para simplificar. El primer término de la ecuación (1) corresponde a la radiancia que es reflejada en la superficie y viaja directamente al sensor, mientras que el segundo término corresponde a la radiancia que

es dispersada por la atmósfera en su trayecto desde la superficie al sensor. La distinción entre ρ y ρ_e cuenta para el efecto de adyacencia. Para ignorar esta última, se iguala $\rho_e = \rho$.

Después de realizada la retribución de agua con el programa, la ecuación (1) se resuelve para las reflectancias de la superficie del píxel en todos los canales del sensor. La metodología de solución implica el cálculo de la radiancia de la imagen L_e promediada espacialmente, desde la cual la reflectancia promediada espacialmente ρ_e , se estima utilizando la ecuación de aproximación de la figura 4.13:

$$L_e \approx \left(\frac{(A + B)\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_a \quad (2)$$

Figura 4.13 – Ecuación de radiancia promediada espacialmente.

El promedio espacial es realizado utilizando una PSF que describe las contribuciones relativas a la radiancia del píxel desde puntos del suelo en diferentes posiciones desde la visual en línea recta (directa). Para resultados precisos, los píxeles con contenido de nubes deben ser eliminados antes de promediar. Los píxeles nubosos se encuentran utilizando una combinación de brillo, relación de bandas y test de vapor de agua.

Este modelo incluye un método para recuperar una cantidad estimada de aerosol/neblina desde píxeles de superficie oscura seleccionados en la imagen, basado en las observaciones de una relación casi fijada entre las reflectancias tanto para píxeles de 660 nm como de 2100 nm. FLAASH ajusta la cantidad de aerosol tras iteración de las ecuaciones (1) y (2) sobre series de rangos del visible, por ejemplo, de 17 km a 200 km, devolviendo un rango estimado del visible con reflectancias de una escena promedio. Con esta estimación, realiza una segunda búsqueda de agua.

FLAASH aporta como resultados:

- Un archivo de reflectancia de la superficie de la imagen.
- Un archivo de vapor de agua.
- Un archivo de mapa de nubes.
- Un archivo de registro.
- Un archivo de plantilla.

4.4.3 ELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA ADECUADA

Se ha revisado la forma detallada de operar de cada herramienta de módulo en el manual de usuario. Se ha elegido la herramienta QUAC dado que el resultado final buscado *es* una corrección atmosférica estándar realizada sobre la imagen, *no así* un estudio atmosférico o de variaciones climáticas sobre una determinada región, que es para lo que FLAASH sería más adecuada. Además, se considera relevante la rapidez en tiempo de ejecución de QUAC, que para la corrección básica por FLAASH se necesitan determinar muchos más parámetros de

entrada, que hay archivos de parámetros de entrada requeridos que habrían de crearse para esta imagen en particular al no estar totalmente configurado para trabajar con imágenes o escenas de sensores poco comunes/desconocidos como DAEDALUS. Finalmente, se considera que para la diferencia notable de trabajo a realizar entre ambas herramientas, QUAC ofrece resultados con fiabilidad igual o superior a FLAASH.

4.4.4 REALIZACIÓN DE LA CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

QUAC trabaja en las regiones espectrales VNIR y SWIR, todas las bandas de la imagen entran en estos rangos. El formato de datos de la escena es BSQ y el sensor es multiespectral desconocido, ambas configuraciones son admitidas por la herramienta. Los valores centrales de las longitudes de onda de las bandas están en la cabecera de la escena, de extensión “.HDR”. La herramienta realizará una rápida y precisa corrección atmosférica bajo las siguientes condiciones:

- Debe haber, al menos, 10 materiales diversos en una escena.
- Debe haber píxeles suficientemente oscuros en una escena para permitir una buena estimación de la línea base del espectro.

Ambas se cumplen satisfactoriamente dentro de la imagen de este PFC, por lo que se puede proceder a realizar la corrección.

- Con la imagen “ATM1997_10” cargada, se pulsa el comando “Quick Atmospheric Correction” sobre el desplegable de la pestaña “Spectral” en la barra de herramientas de ENVI – Figura 4.14 –, que abre el cuadro de diálogo “QUAC Input File” para introducir la imagen de entrada. Se selecciona “ATM1997_10” y se pulsa botón “Ok”.
- Aparece el cuadro de diálogo “QUAC Parameters Input” – figura 4.15 –. Tipo de sensor desconocido y el archivo de salida con la imagen corregida se guarda en la carpeta de la imagen de entrada. Se ha nombrado la imagen como “ATM1997_10_Q”.

El tiempo de ejecución es de aproximadamente 1:30 minutos y la imagen de salida se ha incrementado a 307.98 MB de tamaño.

En la figura 4.17 se puede observar que, al abrir la nueva imagen, aparecen las bandas modificadas con el nombre QUAC delante, indicando que la corrección está realizada.

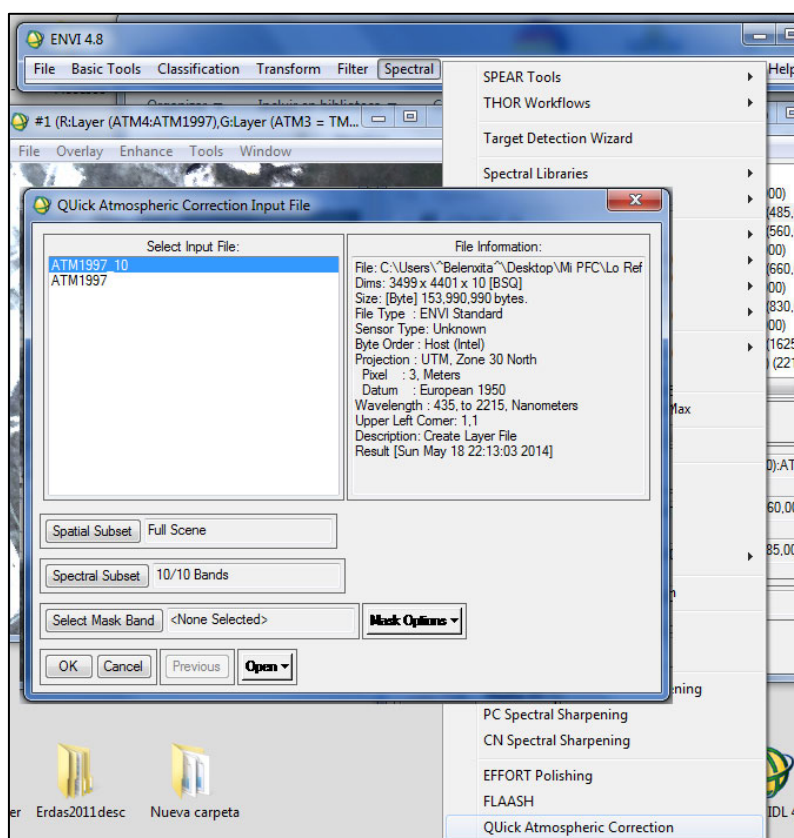


Figura 4.14 – Cuadro de diálogo de la imagen de entrada para QUAC.

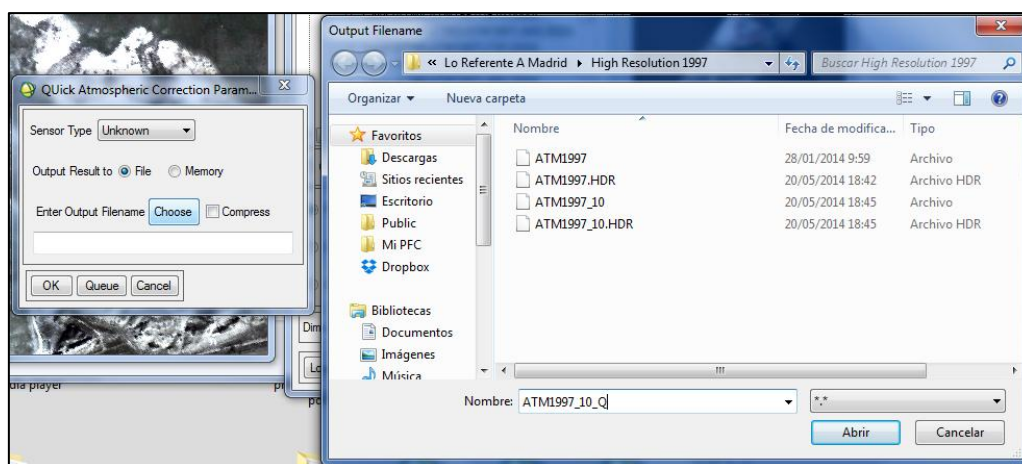


Figura 4.15 – Cuadro de diálogo de parámetros de entrada para QUAC.

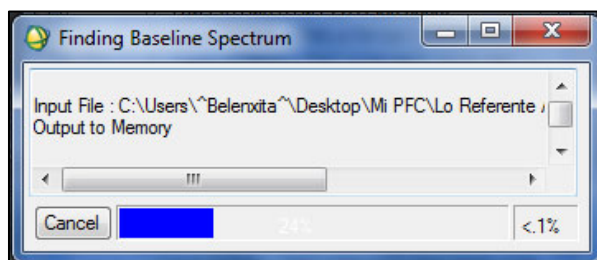


Figura 4.16 – Cuadro de ejecución de la corrección.

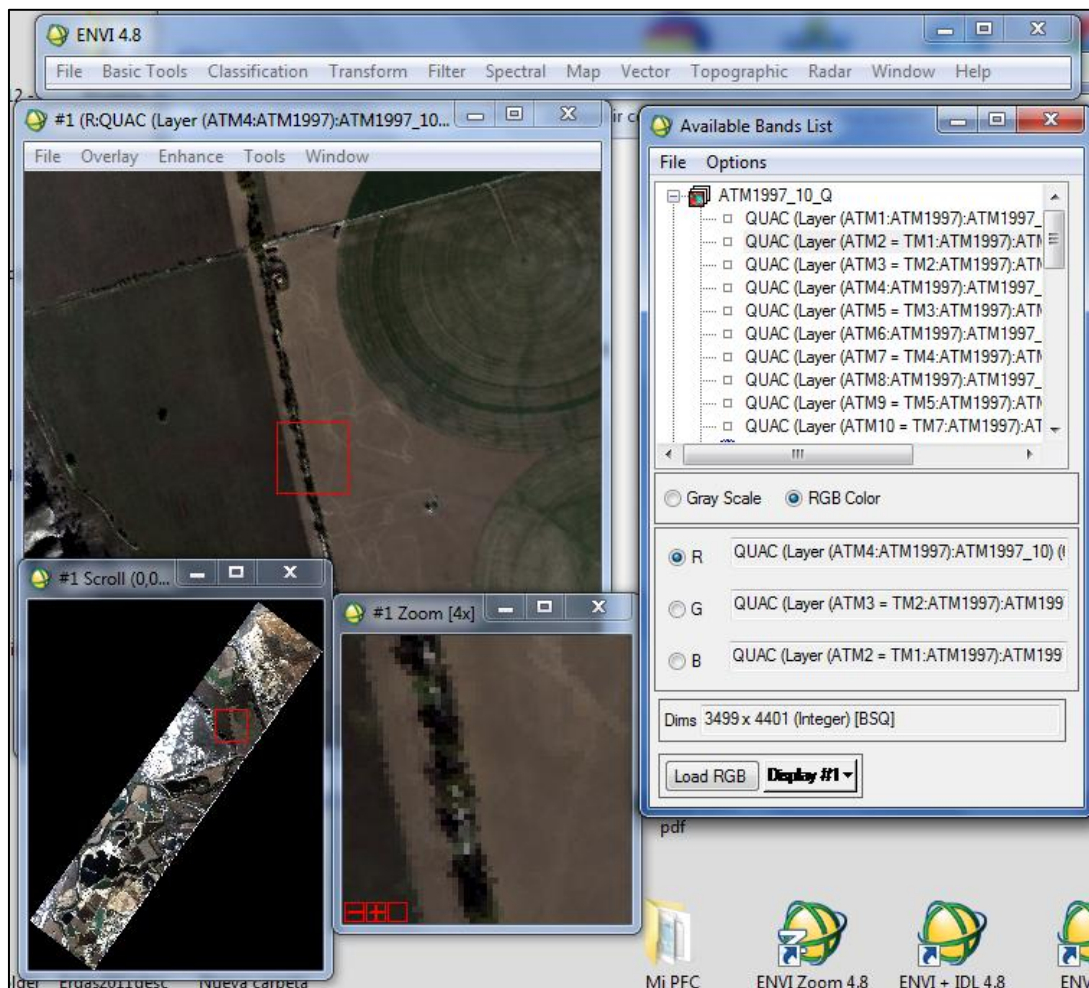


Figura 4.17 – Imagen corregida atmosféricamente.

4.5 CORRECCIÓN GEOMÉTRICA

Para la corrección geométrica de cualquier imagen o escena, es necesario realizar una georreferenciación sobre puntos de apoyo en un mapa de la zona de la imagen con mayor precisión que la aportada por la resolución espacial de la imagen y una metodología de remuestreo que recupere píxeles defectuosos.

4.5.1 DESCRIPCIÓN DE LA GEORREFERENCIACIÓN ENTREGADA

La imagen, en su origen, se creó para satisfacer la finalidad de un estudio temporal de evolución de aguas de las lagunas de gravera de Rivas. Para dicho estudio se necesitaron, además, escenas enteras y por cuartos flotantes del sensor *Thematic Mapper* de la plataforma LANDSAT-5 con 30 m de resolución espacial, registradas en distintas épocas, y documentación cartográfica del IGN sobre la zona de estudio con escala igual o superior a la

ofrecida por la imagen. La georreferenciación se realizó sobre cartografía escaneada de la zona, de escala E: 1/10000, en proyección UTM y sobre el sistema de referencia es ED50.

En la georreferenciación de cualquier imagen se necesita por concepto que el error medio cuadrático – RMS – final sea $RMS \leq 0,5 \cdot Pxl$ para atender a una precisión topográfica concordante con la resolución de la imagen. En este particular, debía (además) materializarse previamente la relación entre la imagen ATM y las escenas y cuartos de escenas TM5. La relación se fijó mediante las resoluciones espaciales como $[ATM/TM] = [3.44/30] = 0.11$, restringiendo la tolerancia requerida a $RMS \leq 0,1 \cdot Pxl$ para una cartografía fiable.

En definitiva, la imagen se aportó georreferenciada sobre un mapa a escala E: 1/10000, con comprobación de puntos de apoyo y con $RMS < 0.1$ píxel de tolerancia, muy superior a la precisión requerida en este PFC. Posteriormente, se le aplicó remuestreo por VMP, que se eligió por ofrecer una menor transformación final de los niveles digitales originales.

4.5.2 SISTEMA DE REFERENCIA ED50

El sistema ED50 – siglas en inglés de *European Datum 1950* – es un sistema de referencia geodésico local para Europa, oficial en España y en vías de extinción en la actualidad. Geométricamente, está definido por el elipsoide de referencia Internacional de Hayford de 1909 y colocado de la forma más adecuada para Europa Occidental. Tiene un solo punto fundamental en la Torre de Helmert, en Potsdam. La orientación del datum se hizo mediante acimutes Laplace – 7 en España – y la escala se determinó mediante lados procedentes de ampliación de bases, repartidos por toda la red. Sobre él se desarrolla la proyección Universal Transversa de Mercator – UTM –, que es el desarrollo conforme cartográfico oficial en el territorio español.

4.5.3 SISTEMA DE REFERENCIA ETRS89

El sistema ETRS89 – siglas en inglés de *European Terrestrial Reference System 1989* y en español de *Sistema de Referencia Terrestre Europeo de 1989* – es un sistema de referencia geodésico global, particularizado para Europa y oficial en España en la actualidad, remplazando al anterior ED50. Coincide con el sistema de referencia ITRS en la época 1989.0 y, por ende, su geometría es cartesiana tridimensional, fijada y ajustada a la Tierra. Tiene por elipsoide asociado el SGR80 – *Sistema Geodésico de Referencia de 1980* – y varios puntos fundamentales correspondientes a estaciones europeas – 93 estaciones de 240 mundiales son europeas –, en donde se infiere la escala y la orientación del marco. Sobre él se desarrolla *actualizada* la proyección UTM, oficial en todo el territorio español.

Un sistema geodésico equivalente al SGR80 es el elipsoide WGS84 – siglas en inglés de *World Geodetic System 1984* –, con finalidad de cartografía cartesiana por posicionamiento GPS.

4.5.4 TRANSFORMACIÓN ENTRE SISTEMAS DE REFERENCIA

La georreferenciación aportada con la imagen se hizo sobre el marco oficial ED50, a extinguir. Sin embargo, el nuevo marco oficial es ETRS89. Las características de ambos sistemas implican diferencias importantes entre sus parámetros. Dado que los parámetros de estos sistemas y de sus elipsoides asociados son la base de los desarrollos cartográficos, las diferencias existentes entre coordenadas planas en la proyección UTM_{ERTS89} respecto a las de la proyección UTM_{ED50} son considerablemente notables y, por tanto, no se pueden despreciar. Entonces, es necesario pasar del sistema de referencia original de la imagen al sistema ETRS89 para obtener cartografía actualizada, y ello se reduce a la consideración de los elipsoides de referencia.

El programa ENVI en la versión 4.8 dispone de transformación de sistemas a partir del registro interno de sistemas de referencia con parámetros estandarizados, pero entre ellos no figura el sistema ETRS89. ERDAS, en la versión IMAGINE 2011, sí contiene éste sistema, por lo que se procede a convertir el formato BSQ del archivo imagen a IMG previamente a la transformación entre ambos sistemas. El proceso a seguir se explica a continuación.

- Figura 4.18: En la pestaña “File” de ENVI, se pulsa sobre el comando “Save File As”. Se abre un desplegable con las opciones. Se pulsa sobre la opción “ERDAS IMAGINE”. Se abre el cuadro de diálogo “Select for ERDAS IMAGINE Output” para la selección de la imagen para la cual se quiere obtener el archivo IMG de salida. Se selecciona el archivo “ATM1997_10_Q”. Comprobados los parámetros, se pulsa el botón “Ok”
- Se abre el cuadro de diálogo “ERDAS IMAGINE Output Parameters” con los desplegables “Block Width” – ancho de bloque – y “Block Height” – alto del bloque – altura de bloque – para especificar las dimensiones del marco en el formato de salida. Pulsando el botón “Choose”, se fija el directorio de salida en una nueva carpeta que se ha creado para guardar en adelante para los trabajos que se realicen con ERDAS. El archivo de salida lleva el mismo nombre que el de entrada. Se pulsa el botón “Ok” – figura 4.19 –. El proceso dura aproximadamente un minuto y medio.
- En la figura 4.21 se muestra la carpeta con la nueva imagen para trabajar con ERDAS. El tamaño de la imagen es de 340.96 MB.

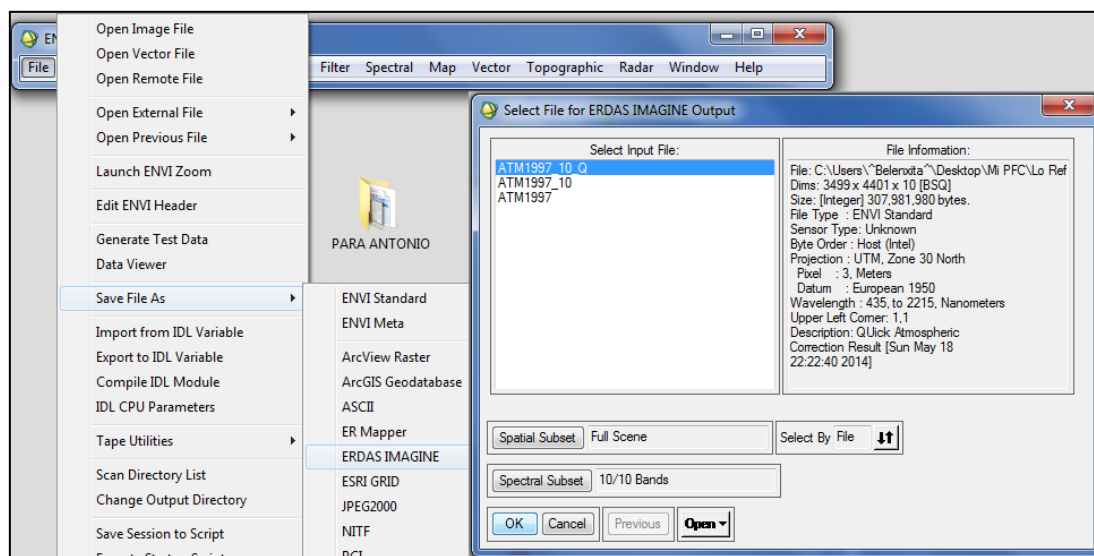


Figura 4.18 – Selección de la imagen para su conversión a formato IMG.

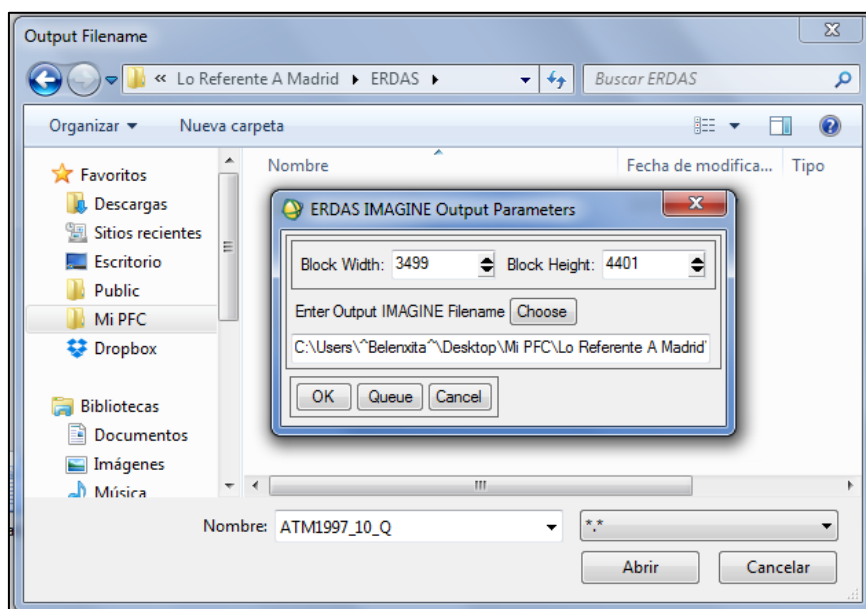


Figura 4.19 – Parámetros de la imagen de salida.

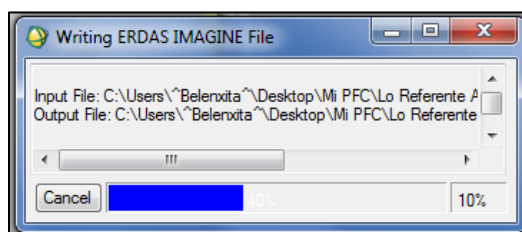


Figura 4.20 – Ejecución de la conversión de formato.

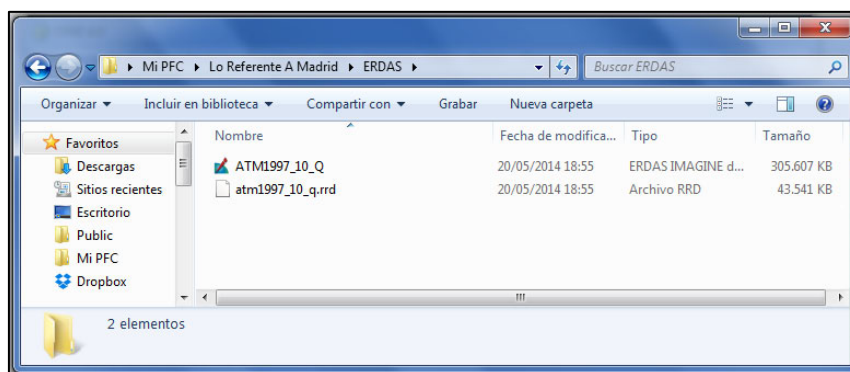


Figura 4.21 – Archivo de salida para ERDAS IMAGE.

En ERDAS, el comando “Reproject” abre el acceso al módulo de transformaciones entre sistemas de coordenadas. Se desea *reproyectar* la imagen georreferenciada desde su sistema de referencia actual a una nueva imagen sobre el sistema de referencia final, es decir, se busca el cambio de ED50 a ETRS89 junto a la representación cartesiana de los píxeles de la imagen en el nuevo desarrollo cilíndrico. Los pasos seguidos se detallan a continuación:

- Se abre la escena en ERDAS IMAGE. Por defecto, al abrir se crea una capa numerada “2D View #1” para soporte de la escena, visible en la pestaña lateral izquierda “Contents”. Con el botón derecho del ratón sobre la capa, se pulsa en la opción “Open Raster Layer” y se abre el cuadro de diálogo “Select Layer to add” para elegir el archivo de entrada. Se elige la imagen y en la pestaña “Raster Options” se verifica que se mostrará en color verdadero.

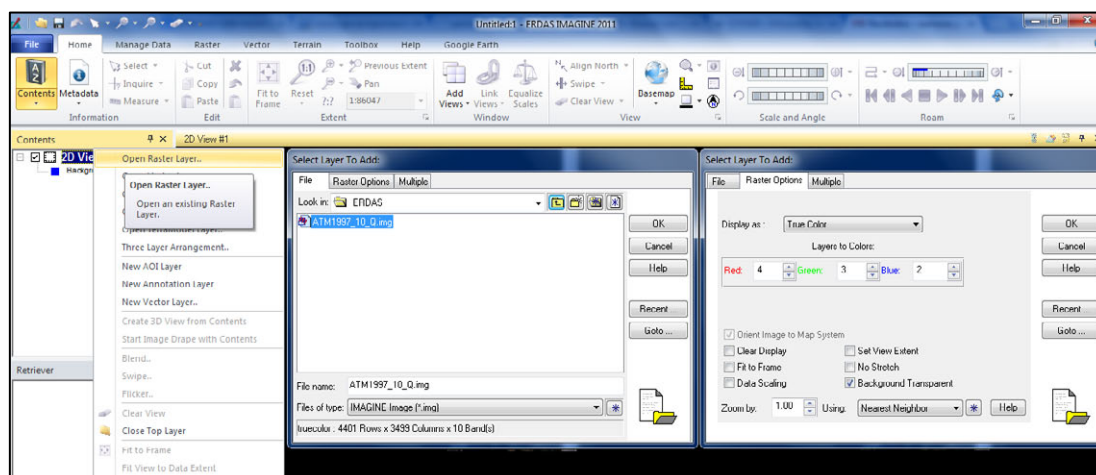


Figura 4.22 – Apertura de imagen ATM en ERDAS IMAGE.

- ERDAS trabaja mediante imágenes piramidales y, si la imagen no tiene ésta propiedad, al abrirla el programa pregunta al usuario si desea crearla desde el archivo. Se acepta la operación y el programa muestra un cuadro de procesado de ésta – figura 4.23 –. En la figura 4.24 se muestra la imagen de trabajo y el interfaz del programa. Pulsando el botón “Metadata” de la pestaña “Home”, se puede revisar los parámetros – figura 4.25 –.

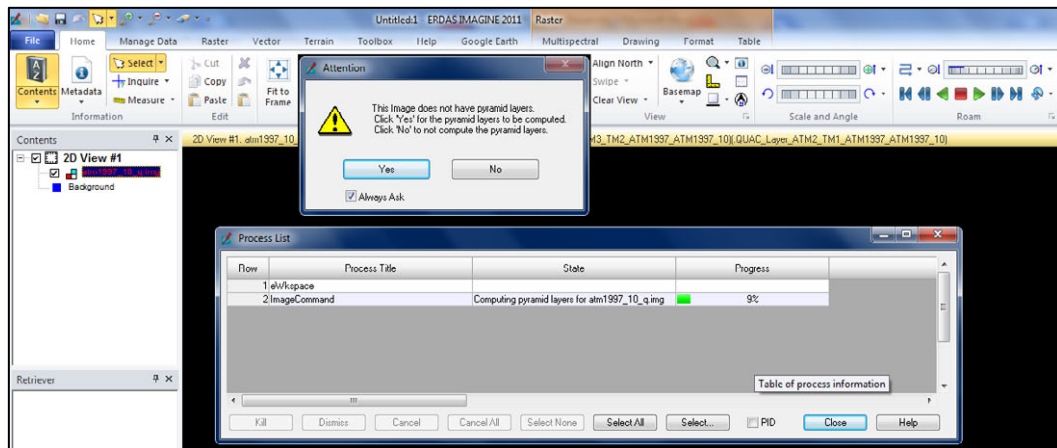


Figura 4.23 – Creación de imágenes piramidales.

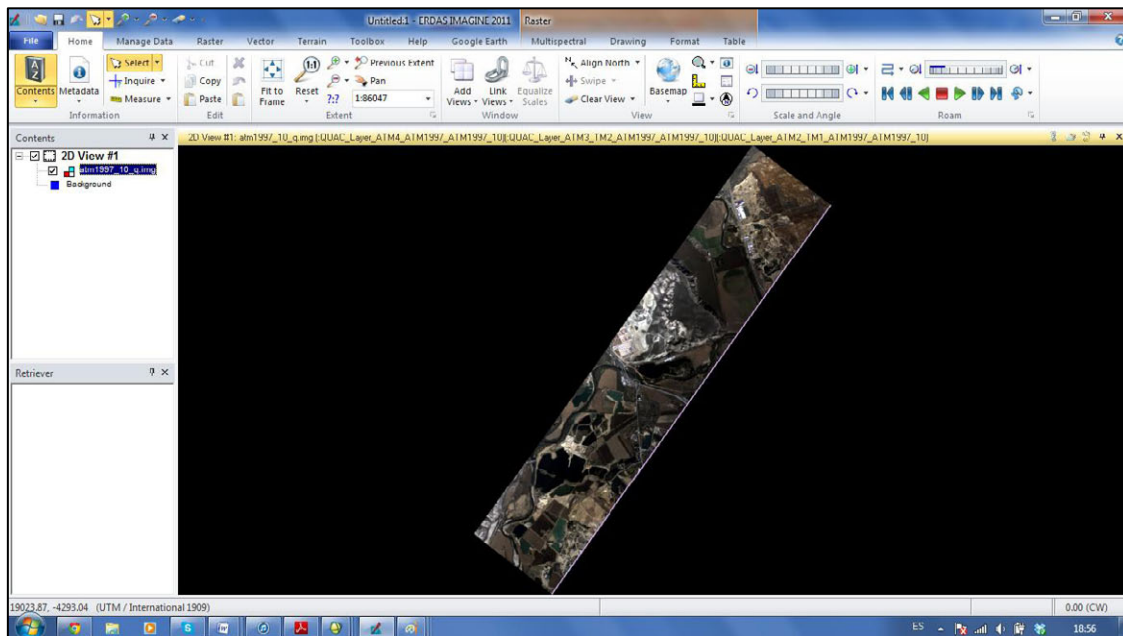


Figura 4.24 – Imagen ATM en ERDAS IMAGINE.

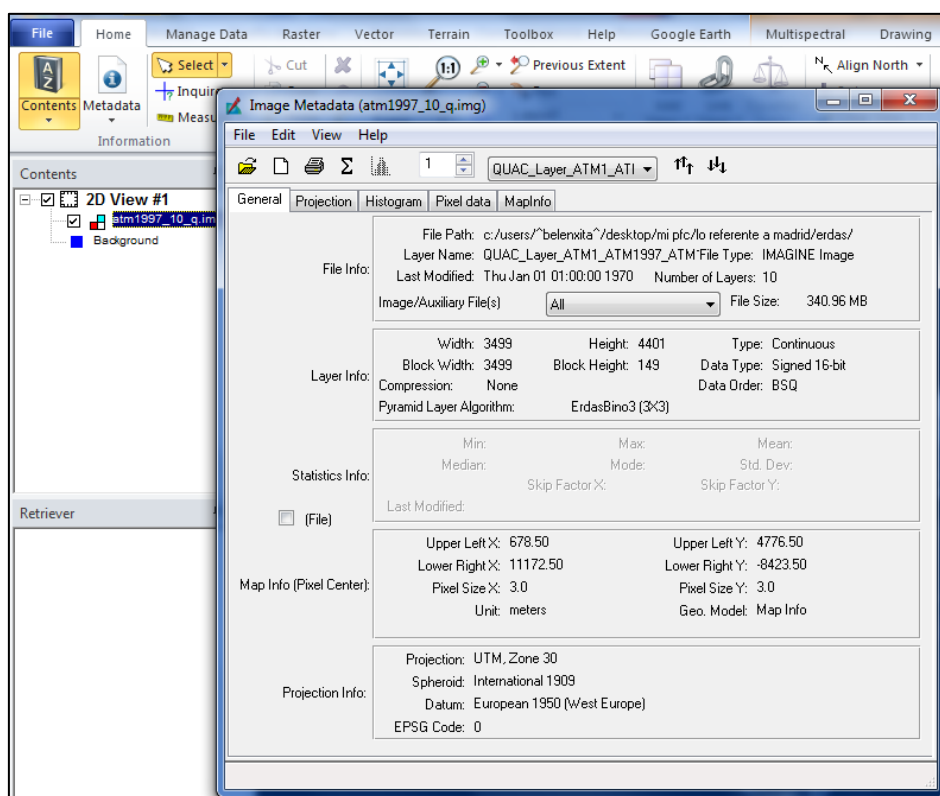


Figura 4.25 – Metadatos de la imagen ATM.

- Se pulsa el comando “Reproject” que se encuentra en la pestaña “Raster” de la barra de herramientas del programa.

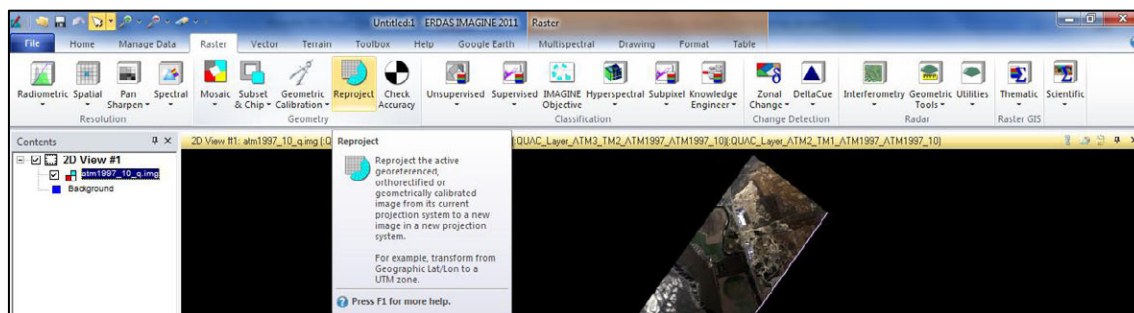


Figura 4.26 – Comando “Reproject” y descripción.

- Se abre el cuadro de diálogo “Reproject Images” para configurar los parámetros de reproyección de la imagen. Las operaciones que se han realizado son:
- Selección desde “Input File” y nombramiento y guardado del resultado en la misma carpeta con “Output File”. Se ha llamado “ATM1997_10Q_R”.
- Apartado “Categories”: Búsqueda del elipsoide GRS 1980 [SGR80], el datum en el que está basado – *North American Datum 1983* – y el hemisferio en el primer despegable. En el segundo, de la proyección UTM sobre el huso 30.
- Restricción del tamaño del píxel de salida en “Output Cell Sizes, X, Y” y que se necesita forzar los píxeles a ser cuadrados en la reproyección.
- Que la cuadratura esté en función del centro de la imagen ráster con “Snap pixel edges to raster image”.
- Método de remuestreo por VMP con el despegable “Resample Method”.
- Aproximación polinómica con ajuste iterativo de ecuaciones mediante “Polynomial Approximation” activada y “Continue Approximation” optada para “If tolerance exceeded”. La tolerancia se ha fijado como 0.1 por los motivos ya expuestos.

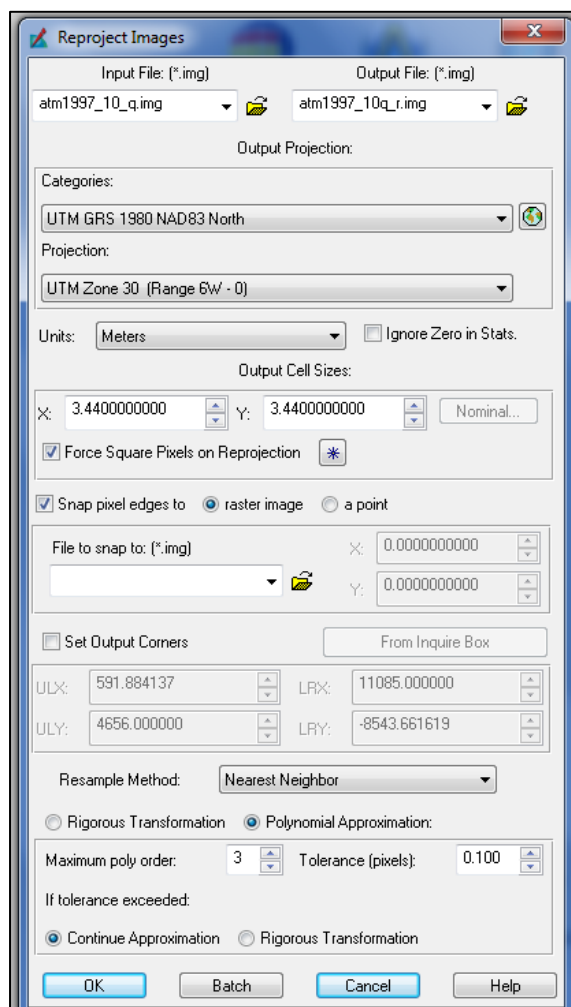


Figura 4.27 – Cuadro de diálogo “Reproject Images” con los parámetros de configuración.

Se hace clic en el botón “Ok” e inmediatamente aparece el cuadro de procesado del archivo que confirma que se está realizando la reproyección. El proceso tarda aproximadamente 1:30 minutos y la imagen resultante tiene 102.66 MB de tamaño. Es coherente, dado que ERDAS ha utilizado un método de compresión del archivo, *Run Length Encoding*. No ha mostrado problemas por la tolerancia dado que ya cumplía una exigencia muy elevada en la imagen inicial, pero si se hubiera excedido pese a la petición de iteraciones (existencia de errores groseros o sistemáticos), se podría bajar su valor hasta máximo 0.5 veces el píxel.

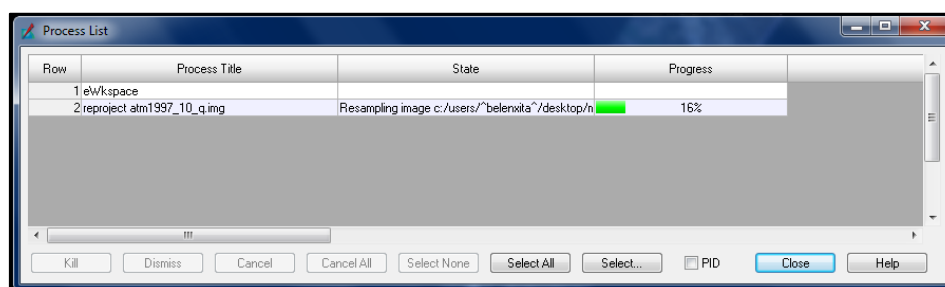


Figura 4.28 – Procesado de la reproyección de la imagen.

- Para mostrar el resultado, se ha abierto una capa raster mediante el botón “Create a new 2D View” del desplegable “Add Views” en la pestaña “Home” de la barra de herramientas principal.

La imagen reproyectada es más clara, dado que se ha utilizado en la reproyección remuestreo por VMP. Pero el remuestreo no será relevante en los siguientes apartados. Finalmente, con el cursor pulsado sobre la imagen resultante – figura 4.30 –, se visualiza en la esquina izquierda inferior que las coordenadas de la imagen se encuentran en el nuevo sistema de referencia.

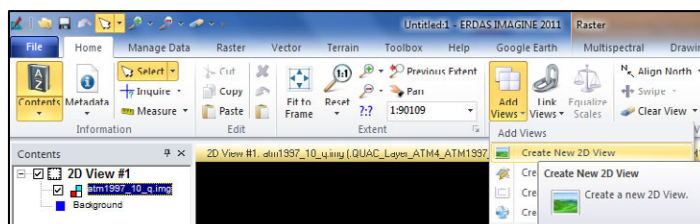


Figura 4.29 – Creación de nuevas capas en ERDAS.

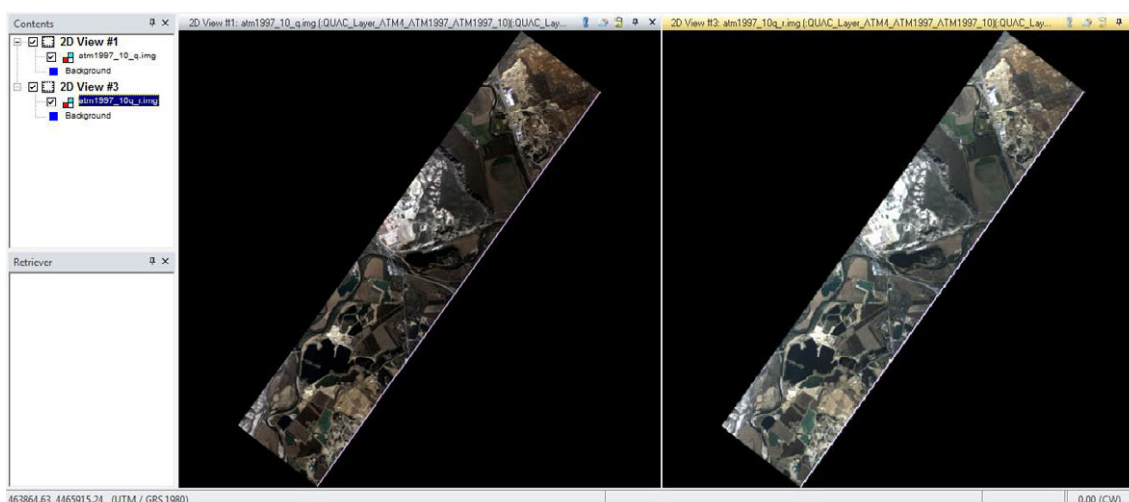


Figura 4.30 – Imagen de entrada e imagen resultante.

4.5.5 COMPROBACIÓN DE RESULTADOS

Para verificar que la reproyección se hizo con éxito, basta con abrir el programa Google Earth – GE –, el cual trabaja sobre el sistema geodésico WGS84. El sistema tiene al IGN como su fuente cartográfica para España y permite obtener coordenadas UTM y/o geográficas de referencia, en cualquier parte del país.

Se ha abierto el programa en la localización de la zona de estudio, se ha configurado el visor de coordenadas para coordenadas UTM en la zona 30 Norte y se ha medido una serie de puntos afines entre la imagen ATM y las imágenes actuales de GE. Para ello, se ha utilizado la herramienta “Añadir una marca de posición”. Se ha nombrado a los puntos de GE con el prefijo ATM y se ha procurado que pertenezcan a elementos paisajísticos poco o nada modificados dentro de la zona de estudio, dado que la temporalidad entre ambas imágenes es de 14 años.

Para obtener las coordenadas, basta con pulsar con el botón derecho sobre el punto en la barra lateral “Lugares” y elegir la opción “Propiedades”.



Figura 4.31 – Medición de coordenadas mediante marca de posición con Google Earth.

A continuación, se muestra una serie de cinco puntos de comprobación. Corresponden a zonas cercanas a las 4 esquinas y al centro de la imagen. Se considera una tolerancia en la que el error de posición entre las coordenadas UTM leídas con GE y las leídas con ERDAS no debe sobrepasar el tamaño del píxel para asegurar que la reproyección ha sido efectiva. Lo que se muestra es que todos los puntos cumplen estar dentro de la tolerancia.

- El primer punto – figura 4.32 – corresponde a la zona cercana al centro de la imagen. Se muestra también el interfaz de cada programa sobre una vista general.
- El segundo punto – figura 4.33 – corresponde a la zona cercana a la esquina superior izquierda de la imagen.
- El tercer punto – figura 4.34 – corresponde a la zona cercana a la esquina superior derecha de la imagen.
- El cuarto punto – figura 4.35 – corresponde a la zona cercana a la esquina inferior izquierda de la imagen.
- El quinto punto – figura 4.36 – corresponde a la zona cercana a la esquina inferior derecha de la imagen.

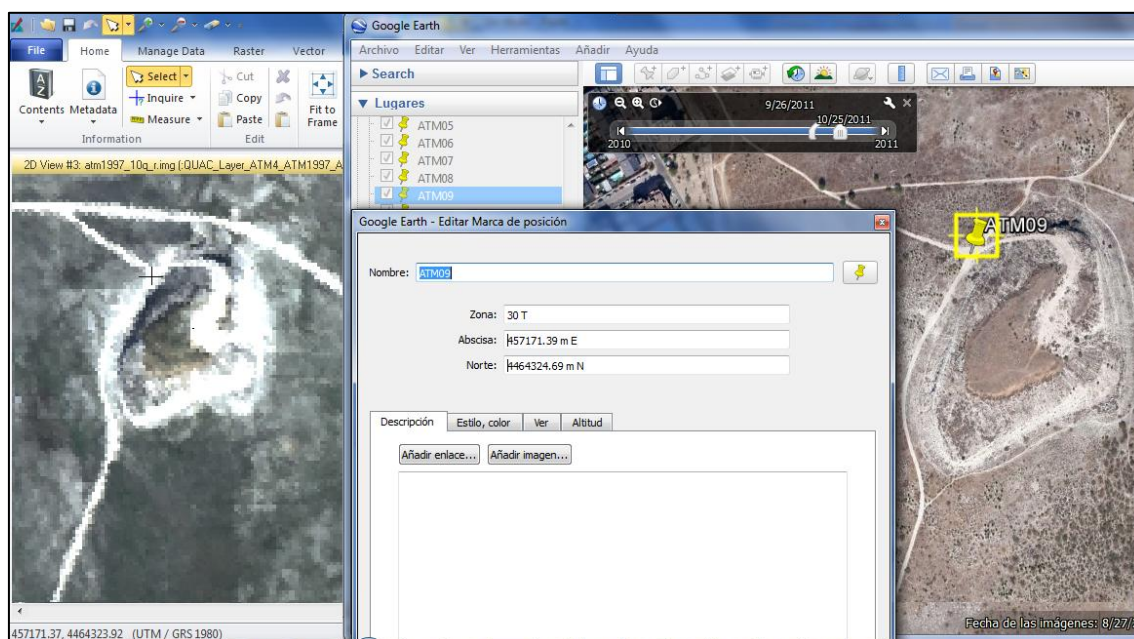


Figura 4.32 – Coordenadas de un punto cercano al centro de la imagen.

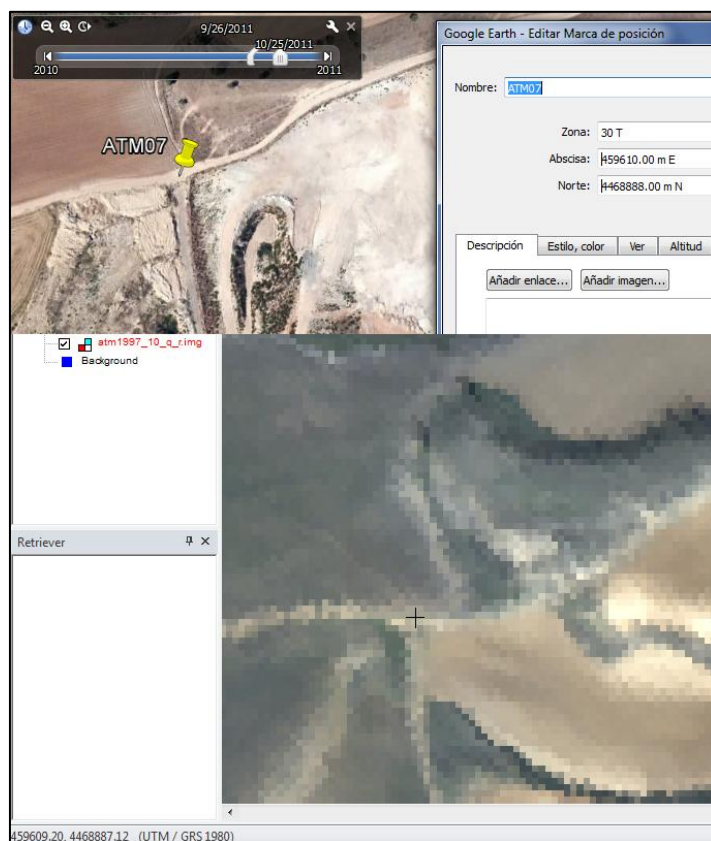


Figura 4.33 – Coordenadas de un punto en la esquina superior izquierda de la imagen.

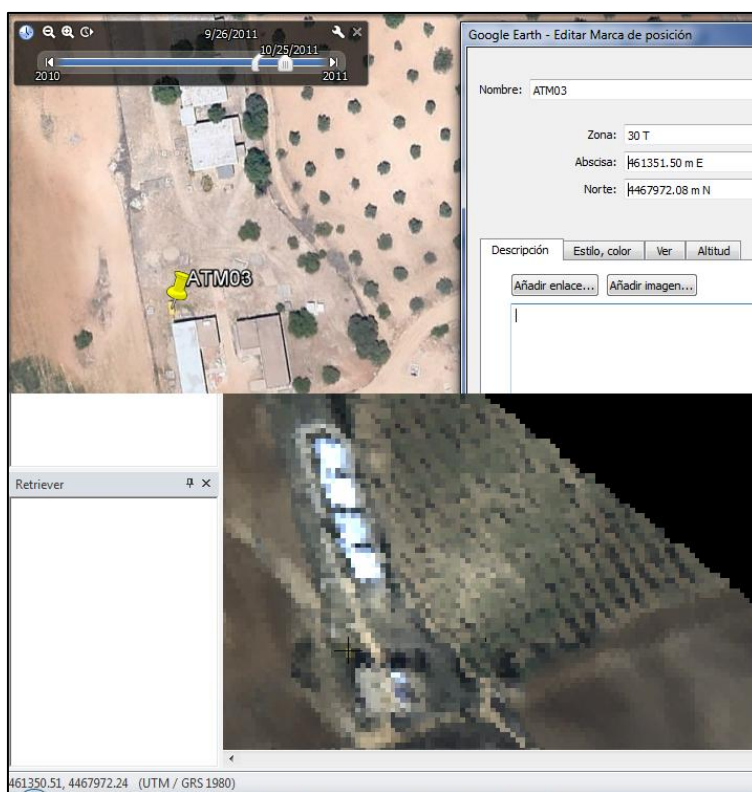


Figura 4.34 – Coordenadas de un punto en la esquina superior derecha de la imagen.

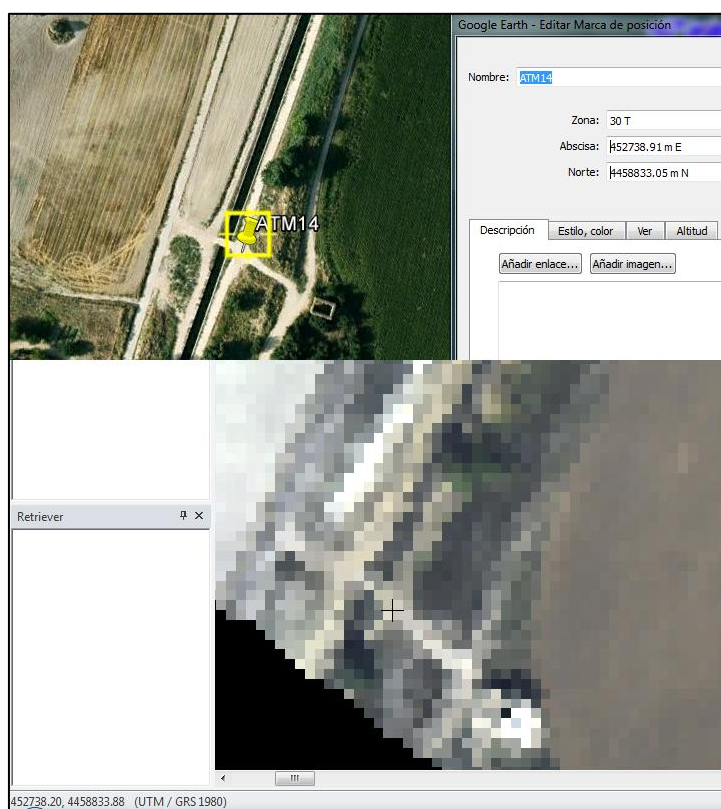


Figura 4.35 – Coordenadas de un punto en la esquina inferior izquierda de la imagen.

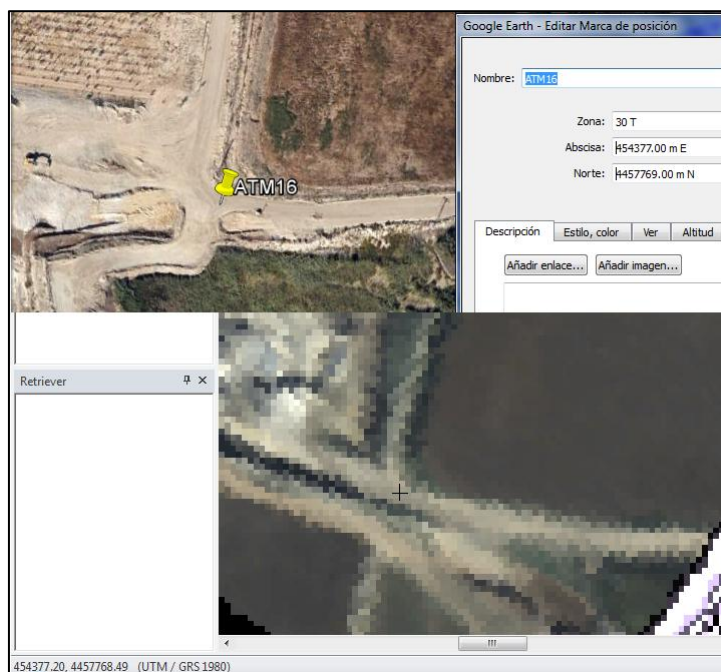


Figura 4.36 – Coordenadas de un punto en la esquina inferior derecha de la imagen.

Como las coordenadas de los bordes y del centro de la imagen muestran una transformación satisfactoria, se puede afirmar que toda la imagen se ha reproyectado satisfactoriamente.

4.6 PRINCIPALES ANOMALÍAS EN LA IMAGEN

En el registro de la imagen se producen distorsiones geométricas en la imagen – posición de los píxeles – debidas a diversas causas.

Se revisan las principales en el presente proyecto, condicionando su naturaleza a la del avión que transportó al DS – 1268 el día del vuelo. Éstas son:

- Distorsión causada por la plataforma de vuelo.
- Distorsión causada por la rotación terrestre.
- Distorsión de oblicuidad.
- Distorsión panorámica.
- Distorsión causada por la esfericidad terrestre.
- Distorsión causada por el efecto del relieve.

4.6.1 DISTORSIÓN CAUSADA POR LA PLATAFORMA

En el caso de la imagen ATM, la plataforma es la cabina del aviocar CASA 212 – 200. Desde un avión, la imagen se registra con estabilidad muy inferior a la de los satélites, sobre todo por la presencia de atmósfera. Los movimientos que generan distorsiones son la deriva, el aleteto, el cabeceo, el ladeo y las variaciones de altura y de velocidad del avión.

Por ello, se utilizó durante el vuelo un sistema PAV – 10, con el que se corrigió deriva y cabeceo. El alabeo se corrigió en el momento del registro de la imagen mediante un giróscopo. Los algoritmos de corrección modelizan la posición del Aviocar y la geometría del sensor a través de los datos que un ordenador a bordo graba sobre la captura.

La altitud y la posición del avión son el equivalente aéreo a las efemérides satelitales. Las posiciones de vuelo se comprobaron con un DGPS, y los datos registrados se integraban en los del DS – 1268. Con estos datos se calculó en todo momento la variación de altura y de velocidad del avión, y después se integraron numéricamente a la imagen. Los *offsets* se predeterminaron previamente al vuelo. Todas las comprobaciones se realizaron en el INTA.

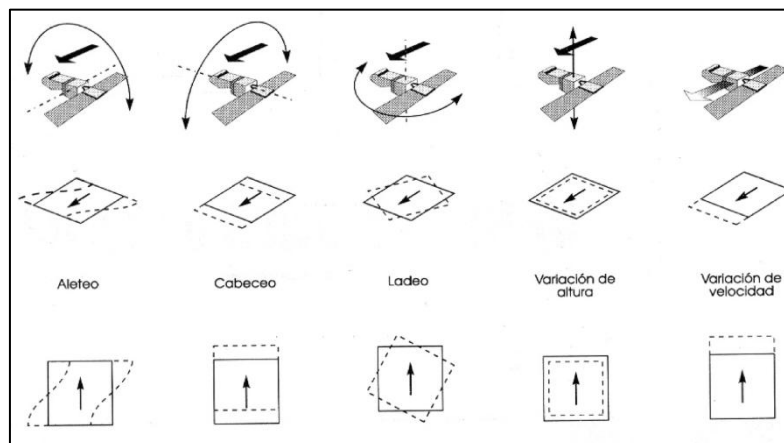


Figura 4.37 – Influencia sobre la geometría final de un píxel por cada movimiento en el sensor.

4.6.2 DISTORSIÓN CAUSADA POR LA ROTACIÓN TERRESTRE

La naturaleza del sensor hace que su registro se haga barriendo sucesivas líneas. Debería aportar como resultado una imagen cuadrada o rectangular, pero debido a la rotación terrestre este barrido sufre un desplazamiento de las líneas hacia el oeste, dejando una escena romboidal en lugar de rectangular. Su influencia es mayor a más distancia de la tierra, y por consecuencia, afecta más a las escenas satelitales. En el caso de la imagen ATM, se puede considerar el desplazamiento diferencial, dada la relativamente baja altura de vuelo (no mayor a 1.5 km).

El desplazamiento de la imagen se puede calcular en función de la velocidad de traslación del vehículo de vuelo, de la longitud de la imagen y de la altitud. Al ser tan pequeño, quedó corregido al realizar la georreferenciación inicial.

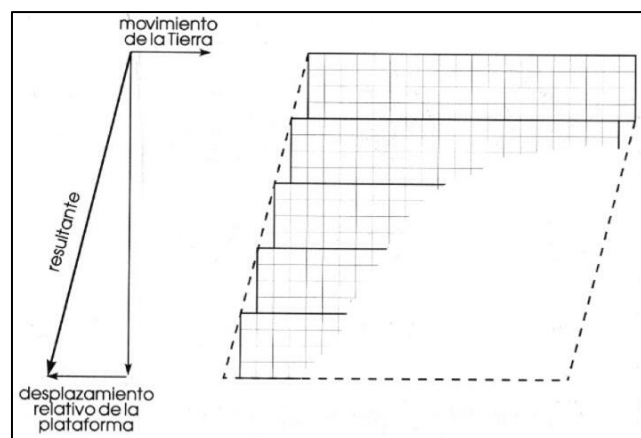


Figura 4.38 – Geometría de una imagen con distorsión por rotación terrestre.

4.6.3 DISTORSIÓN DE OBLICUIDAD

El sensor DS – 1268 es un sensor óptico-electrónico y, por ello, no hace un registro instantáneo de una línea. Tarda un pequeño intervalo de tiempo en el que habrá continuado su desplazamiento, generando en la imagen geometrías romboidales similares a las causadas por rotación terrestre. Esta distorsión también se corrige, por consecuente, *moviendo* los píxeles de la imagen a su posición más probable mediante georreferenciación. Se da por corregido en la georreferenciación inicial.

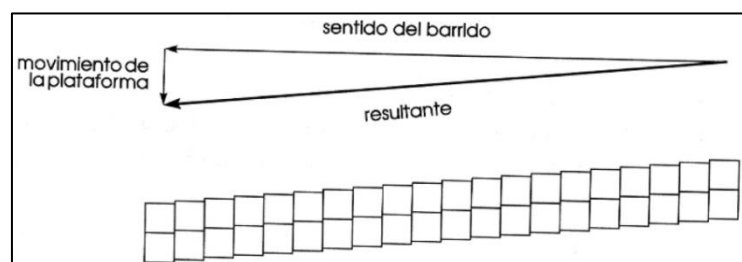


Figura 4.39 – Geometría de una imagen con distorsión de oblicuidad.

4.6.4 DISTORSIÓN PANORÁMICA

El tamaño de la imagen y el del píxel vienen condicionados por la altura de vuelo y el IFOV del sensor. Los dos posibles IFOV que se pueden configurar en el hardware del DS – 1268 son 2.5 mrad [85,92°] y 1.25 mrad [42,96°]. Para convertir un IFOV a área de terreno, se considera independientemente las direcciones de avance (y) y transversal (x):

$$L_x = H \cdot \tan(\text{IFOV}) \cdot \sec^2\theta$$

$$L_y = H \cdot \tan(\text{IFOV}) \cdot \sec\theta$$

Es decir, el tamaño efectivo de una celda y, por tanto del área de terreno que contiene, aumenta al alejarse del nadir. Para un píxel situado en el nadir, las relaciones anteriores se convierten en:

$$L_x = H \cdot \tan(\text{IFOV})$$

$$L_y = H \cdot \tan(\text{IFOV})$$

La información que recoge cada píxel es de dos veces la altura media del sensor.

El ancho de una imagen se determinada por la ecuación:

$$L_T = 2 \cdot H \cdot \tan(\text{IFOV}/2)$$

Cuando el IFOV del sensor es pequeño, la distorsión generada es prácticamente despreciable. No es el caso del sensor ATM, para éste el tamaño del píxel aumenta considerablemente, según la distancia en la imagen respecto al nadir, hasta 1.24 veces. Se produce entonces una pérdida irreversible de resolución espacial. Por ello, el laboratorio de teledetección del INTA desarrolló una aplicación que corrigió el efecto, de tal manera que todos los píxeles ocuparían el mismo terreno sobre la imagen, aunque la resolución real sigue siendo

$$L_x = H \cdot \tan(\text{IFOV}) \cdot \sec^2\theta$$

La imagen se aportó corregida de distorsión panorámica.

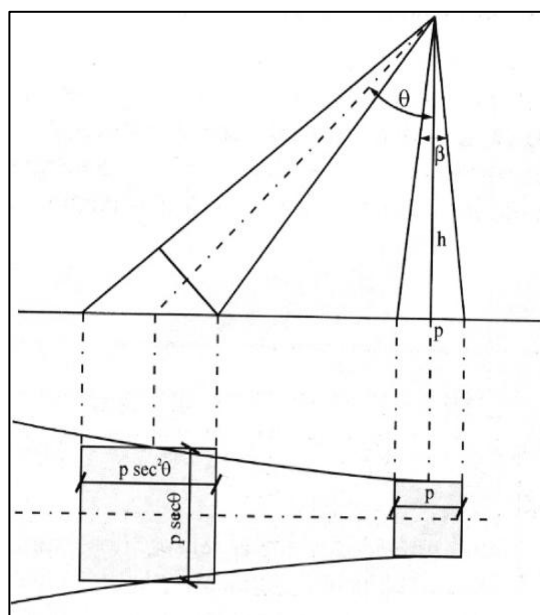


Figura 4.40 – Geometría de un píxel con distorsión panorámica.

4.6.5 DISTORSIÓN CAUSADA POR LA ESFERICIDAD TERRESTRE

La distorsión por curvatura terrestre es un efecto superpuesto al anterior en el caso de sensores que barren grandes extensiones, y prácticamente despreciable en sensores de elevada resolución que barren zonas relativamente reducidas – por ejemplo, 185 km de LANDSAT –.

Por una parte, el sensor ATM registró la presente imagen con una resolución muy alta. Por otra parte, el terreno que barre puede considerarse de tierra plana a efectos topográficos, puesto que el ancho de imagen sólo mide 2.5 km de ancho y el máximo abarcable no llega a medir 20 km de largo, esta última distancia equivale aproximadamente a 10'.47 minutos de arco sexagesimal – se puede considerar tierra esférica aproximadamente a partir de 111.2 km, equivalentes a 1° sexagesimal –, por lo que la zona es de reducidas dimensiones.

En definitiva, no se necesita corregir la imagen de esfericidad terrestre. Además, el hecho inicial de haber georreferenciado la imagen mediante un ajuste por aproximación polinómica que cumple con una tolerancia muy restrictiva, da por corregidos los pequeños defectos diferenciales que pudieran existir debidos a este factor.

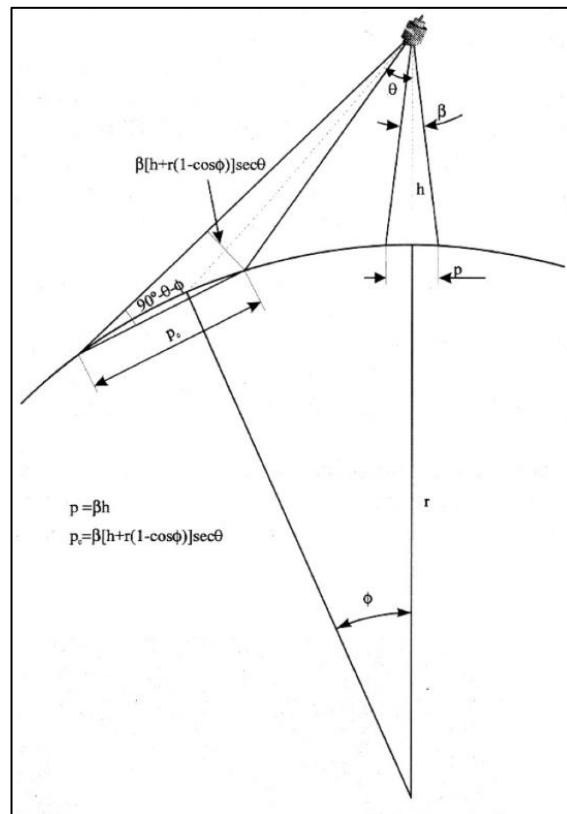


Figura 4.41 – Geometría de la deformación de la imagen por esfericidad terrestre.

4.6.6 DISTORSIÓN CAUSADA POR EL EFECTO DEL RELIEVE

En terrenos con grandes desniveles, se produce en teledetección un efecto de desplazamiento de relieve muy grande. Puesto que no se trata de una perspectiva cónica, el efecto sólo afecta en dirección transversal a la traza.

Se precisan desniveles suficientemente grandes para que no resulten despreciables en relación con la altura de la plataforma del sensor.

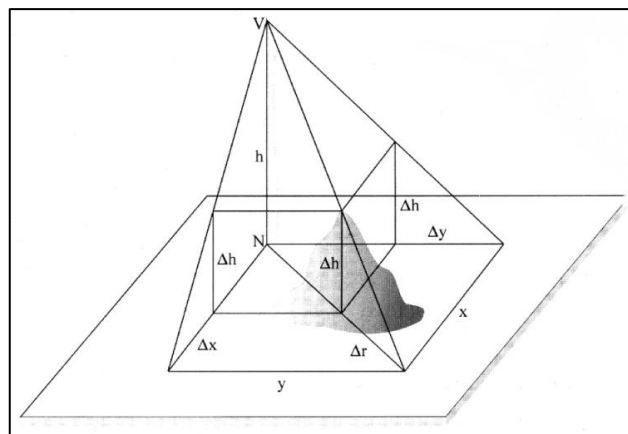


Figura 4.42 – Geometría de la deformación de la imagen por esfericidad terrestre.

Respecto a la imagen, los desniveles de la zona de estudio no llegan a alcanzar los 10 m, lo que equivale aproximadamente a un 0.73% del valor total de la altura de vuelo, siendo ésta 1376 m.

Conclusión: La distorsión generada por efecto del relieve es irrelevante en este caso.

4.7 REALCE DE IMAGEN

El remuestreo realizado sobre la imagen, ha hecho perder cierta fidelidad de reflectancia de los ND, suavizando paulatinamente bordes entre zonas y contrastando más la imagen. Este resultado, de cara a la siguiente fase del proyecto donde se realizan de clasificaciones de elementos, podría dificultar el obtener los resultados deseados.

Un realce de contraste no es necesario ya que, en las bandas del visible, los histogramas son similares y en las del IR se homogeneizan. Es decir, la imagen tiene contraste alto en los ND.

La solución se reduce a aplicar un filtrado a la imagen que sea capaz de devolver valores para los ND que sean semejantes a los obtenidos tras el análisis de reflectancias en la corrección atmosférica.

ERDAS dispone de una biblioteca con algoritmos de filtrado y de un creador de filtros, tanto para realce de imágenes pancromáticas, como para realce de imágenes multiespectrales. Las opciones de filtrado se encuentran dentro de la pestaña “Raster”, en el botón desplegable “Spatial”. Para elegir escoger el adecuado, se ha probado gran parte de los filtros con una copia de la imagen y se ha comparado los resultados.

Se han descartado el remuestreo del tamaño del píxel, la realización de degradado de la imagen y la medición de textura de los elementos de la imagen, por no aportar el remuestreo de niveles digitales del modo que se requiere. Así también el filtrado *homomórfico* dado que, saca los detalles de las zonas más oscuras, aportando una imagen ilegible.

Se ha creado, un filtro paso alto a partir de uno existente en la biblioteca, sobre matriz 3x3. El resultado es un realce de frecuencias en zonas de transición, pero con homogeneización incluida en los bordes que puede dificultar la clasificación que se pretende llevar a cabo.

Row	1	2	3
1	-4.000	-10.000	-4.000
2	-10.000	-64.000	-10.000
3	-4.000	-10.000	-4.000

Figura 4.43 – Filtro paso alto modificado.

Se ha descartado los filtros no direccionales al ser más indicados para *vectorizar* los bordes. El filtro de análisis focal “desviación estándar”, aporta resultados similares a los de éstos, por lo que tampoco se considera.

El algoritmo “Crisp” realza los bordes, pero oscurece en exceso los valores digitales de la imagen. Un filtro estadístico homogeneiza el pixelaje en una zona del mismo color, pero en contra, difumina los bordes en los cambios de elementos. Los filtros de análisis focal, por lo general suavizan los bordes.

Se ha utilizado, finalmente, un filtro adaptativo. Con matriz de 3x3, ha mejorado las frecuencias espaciales de los píxeles sin modificar excesivamente los bordes. Se ha variado la matriz a una 5x5 y se ha encontrado un resultado más pobre donde los píxeles pierden identidad. Por tanto, la solución es el filtro adaptativo Wallis de matriz 3x3.

La aplicación del filtro se muestra en las figuras 4.44 y 4.45. Los resultados se muestran en la figura 4.46, donde el visor de la izquierda muestra la imagen de entrada, el de la derecha superior muestra el filtro para la máscara 3x3 y el de la derecha inferior, el filtro para la máscara

5x5. El fichero de salida se ha llamado “ATM1997_10QR_F”. Tiene 115.25 MB de tamaño y compresión *Run Length Encoding*.

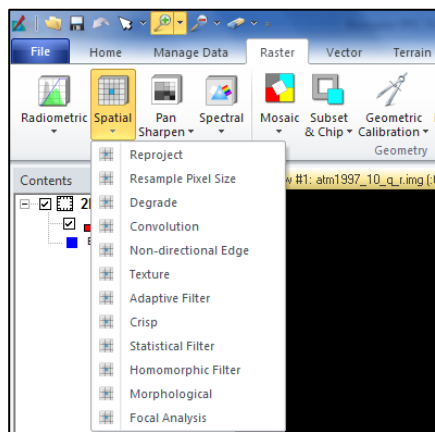


Figura 4.44 – Filtrado para una imagen XS.

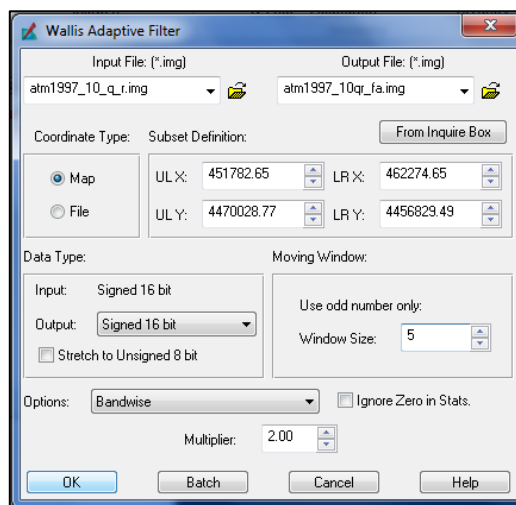


Figura 4.45 – Configuración del filtro adaptativo Wallis.



Figura 4.46 – Resultados del filtro adaptativo Wallis.



5. RECORTE DE LA IMAGEN

5.1 RECORTE DE LA IMAGEN

Al haber realizado en el pre – proceso de imagen una separación de bandas y tras las sucesivas veces en que se ha remuestreado la imagen, se crea en la imagen un borde de superposición entre bandas. Se debe prescindir de este borde para el estudio de la imagen, por lo que el siguiente proceso del proyecto se refiere al trabajo de recorte de la imagen.

5.2 PROCESO OPERATIVO

Para realizar el recorte de una imagen es necesario crear un área de interés (AOI). El proceso que se ha seguido es el descrito a continuación:

- Pestaña “File” de la barra de herramientas: se selecciona la opción “New”, el desplegable “2D View” y el comando “AOI Layer”. En “Contents” aparecerá la nueva AOI creada.

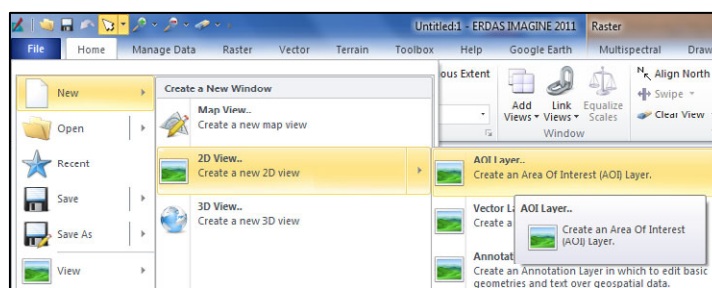


Figura 5.1 – Creación previa de un Área de Interés.

- Figura 5.2: Mediante la herramienta “Polygon” en la pestaña “Drawing” de la barra de herramientas, se dibuja el área de interés que se pretende conservar tras el recorte.

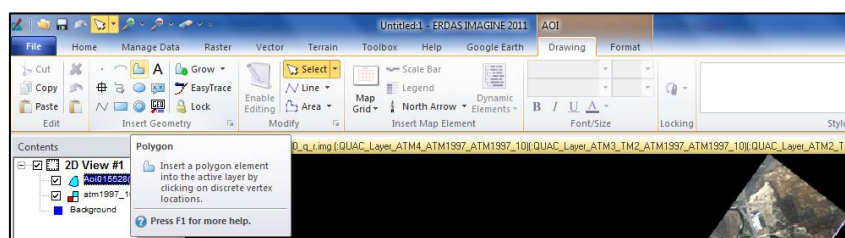


Figura 5.2 – Definición del área de Interés.

- Figura 5.3: Se realiza el recorte de la imagen desde la pestaña “Raster” de la barra de herramientas, sobre el botón desplegable “Subset & Chip” y la opción “Create Subset Image”. Ésta abre el cuadro de diálogo “Subset”, en donde las modificaciones de parámetros a realizar son:
 - Nombrar el fichero de salida y guardarlo en la carpeta del de entrada. Éste se ha llamado “ATM1997_10QRF_R”.
 - Signed: 16 bits.
 - En la parte inferior del cuadro de diálogo se encuentra el botón “AOI” para seleccionar el área de interés descrita. Se pulsa y abre un nuevo cuadro de diálogo de elección del AOI “Choose AOI”, en el cual se selecciona la opción “Viewer”.

- Se acepta el proceso pulsando “Ok” en ambos cuadros de diálogo. El proceso tarda un minuto y medio y el tamaño de salida del fichero se ha reducido a 111.90 MB.

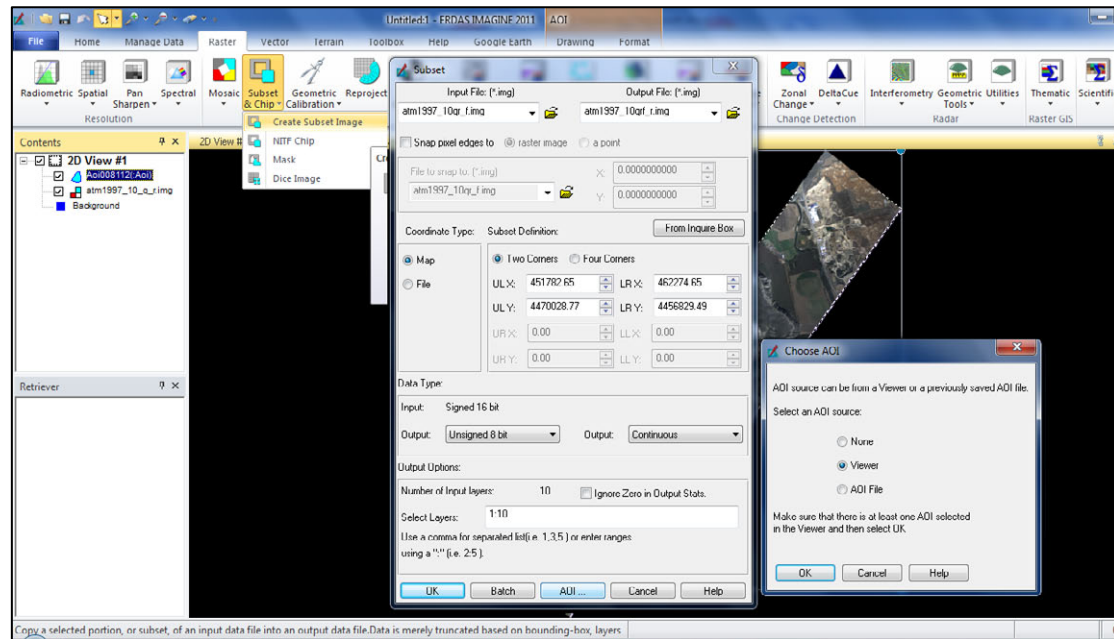


Figura 5.2 – Recorte de la imagen.

5.3 RESULTADO



Figura 5.3 – Imagen resultante ATM recortada.



6. ANÁLISIS EXPLORATORIO

6.1 ANÁLISIS VISUAL

El objetivo de esta fase del proyecto es poder obtener cartografías de usos del suelo de la zona de estudio mediante el método de clasificación supervisada.

Al clasificar una imagen, se pretende definir los píxeles de la misma en categorías que definan rasgos de interés en la superficie terrestre, como por ejemplo rasgos geomorfológicos, geológicos, vegetación, cubiertas, etc. Por esto, antes de proceder a realizar cualquier tipo de clasificación en una imagen es conveniente realizar un análisis exploratorio de los valores de reflectancia, con el fin de obtener información adicional que facilite la clasificación.

Una clasificación se realiza en 3 fases:

- Fase de entrenamiento: se definen digitalmente las clases o categorías a discriminar.
- Fase de Asignación: el ordenador asigna a cada uno de los píxeles de la imagen una categoría.
- Fase de comprobación y verificación de los resultados: el analista comprueba que los resultados obtenidos son correctos.

El análisis visual de la imagen entra en la fase de entrenamiento y es necesario para definir la etiqueta que identifique la categoría asignada a cada píxel.

En el caso de la imagen ATM, el análisis consta de las siguientes fases:

- Fotointerpretación de combinaciones de bandas.
- Definición de posibles clases existentes.
- Análisis de firmas espectrales.

6.2 FOTOINTERPRETACIÓN DE COMBINACIONES DE BANDAS

Mediante técnicas de fotointerpretación de diferentes combinaciones de bandas es posible obtener información, en principio fiable, de los usos y coberturas de una zona.

Se ha estado trabajando sobre la imagen en color verdadero, con combinación de bandas [R, G, B] = [4, 3, 2]. Esta combinación se mantiene inicialmente para un análisis generalizado, posteriormente se utilizarán otras combinaciones.

Una clasificación no es absoluta, sino más bien una caracterización particular válida para una determinada imagen y un determinado territorio. Es por ello que, de la documentación revisada sobre la zona de estudio, las técnicas de fotointerpretación y la información aportada por la imagen en color verdadero, se obtiene mucha información sobre los usos y coberturas del suelo.

Mediante fotointerpretación se llegan a observar inicialmente, de forma genérica, 9 categorías relativas a coberturas y usos aplicados al suelo: suelo urbano, vegetación de matorral, carreteras, caminos de tierra, vegetación de regadío, vegetación autóctona, agua, pastizal y suelos desnudos.

Se muestra a continuación una comparativa con imágenes de Google Earth y del Sig-Pac para revisar las zonas predefinidas mediante la discriminación temporal de elementos en las imágenes.

Se considerará la temporalidad puesto que el clima de la zona y la variación pluvial a lo largo del año es relevante para clasificar los suelos, y porque la composición en color verdadero de la imagen ATM denota tonos similares a los de vegetación en las masas de agua de la zona de estudio, que pueden resolverse por análisis visual de imágenes de distintas épocas. La imagen ATM a finales del mes de octubre de 1997, sobre la zona de estudio las ortoimágenes del visor del Sig-Pac son tomadas a finales de mayo de 2008 y las imágenes del visor de Google Earth están registradas a principios de marzo de 2007 y a principios de agosto de 2011.

- Zona urbana: a ésta categoría corresponden las edificaciones de los pueblos, polígonos industriales, carreteras, etc. En la imagen ATM, los colores de esta categoría son variados, generalmente rojizos o blancos para las edificaciones y grises para las carreteras. Se pueden observar ciertas zonas con tonos verdosos que se corresponden en terreno con vegetación de pigmentación verdosa, con finalidad ornamental y que inicialmente entra en la categoría de regadío.



Figura 6.1 – Zona urbana.
Imagen ATM, izquierda. Imagen Sig-Pac, centro. Imagen Google, derecha.

- Vegetación de matorral: la vegetación de matorral varía en pigmentación a lo largo del año, siendo de tonalidades verdes grisáceas en la época de lluvias y de tonalidades marrones en la época estival.



Figura 6.2 – Vegetación de matorral.
Imagen ATM, izquierda. Imagen Sig-Pac, centro. Imagen Google, derecha.

- Carreteras: las carreteras se observan con tonalidades grisáceas oscuras y claras que, dada la resolución, son fáciles de distinguir.



Figura 6.3 – Carreteras.
Imagen ATM, izquierda. Imagen Sig-Pac, centro. Imagen Google, derecha.

- Caminos de tierra: los caminos de tierra aparecen en colores beige o blanquecinos amarillentos, dada la composición del suelo (mezcla de áridos y yesos).



Figura 6.4 – Caminos de tierra.
Imagen ATM, izquierda. Imagen Sig-Pac, centro. Imagen Google, derecha.

- Vegetación de regadío: la vegetación de regadío aparece con variedad de tonalidades marrones y verdes, dependiendo de la época en la que se cultive o de la respuesta de la vegetación al clima.



Figura 6.5 – Vegetación de regadío.
Imagen ATM, izquierda. Imagen Sig-Pac, centro. Imagen Google, derecha.

- Vegetación autóctona: en esta categoría entran las plantas de la ribera de las lagunas y del río Jarama que atraviesa la zona de estudio. Toda la vegetación aparece de color verde oscuro en la imagen ATM, y a veces es confusa.

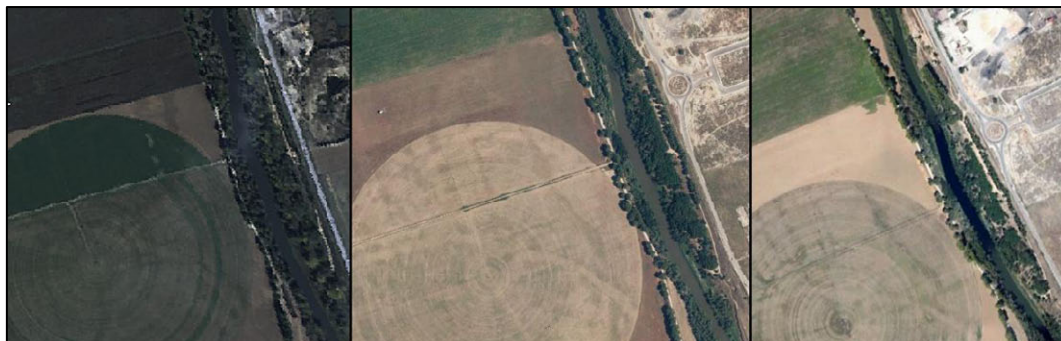


Figura 6.6 – Vegetación autóctona en la ribera del río.
Imagen ATM, izquierda. Imagen Sig-Pac, centro. Imagen Google, derecha.

- Agua: los distintos microorganismos que habitan las lagunas de la zona de estudio y la profundidad variable de éstas, han hecho que el agua vaya tomando en cada masa de agua colores distintos, variando en tonos verdosos e incluso en tonos oscuros que bien pueden confundirse con sombras. Este problema se tratará en las clasificaciones.



Figura 6.7 – Agua del río y de las lagunas.
Imagen ATM, izquierda. Imagen Sig-Pac, centro. Imagen Google, derecha.

- Pastizal: Las mejores distinciones se encuentran en el norte de la imagen ATM. En ella, los elementos de esta categoría se presentan en tonos de amarillos muy claros.



Figura 6.8 – Pastizal.
Imagen ATM, izquierda. Imagen Sig-Pac, centro. Imagen Google, derecha.

- Suelos desnudos: Los suelos también tienen variaciones, sobretodo en el entorno de las explotaciones de áridos, pero en su gran mayoría aparecen casi blanquecinos en color verdadero, dado que la mayoría son de composiciones calcáreas y yesíferas.



Figura 6.9 – Suelos desnudos.
Imagen ATM, izquierda. Imagen Sig-Pac, centro. Imagen Google, derecha.

Con la combinación de bandas $[R, G, B] = [9, 7, 2]$ se puede visualizar la banda del infrarrojo cercano en verde, y del infrarrojo de onda corta en el rojo. La combinación con las bandas $[10, 6, 2]$ permite la misma visualización, pero para la banda 10 del infrarrojo medio y la banda 6 del infrarrojo próximo.

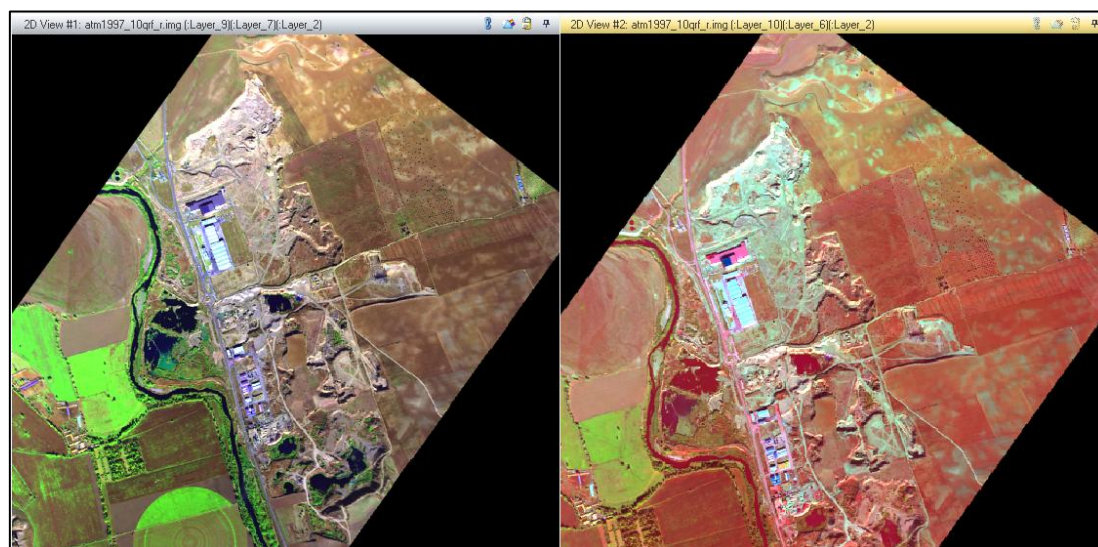


Figura 6.10 – Composición de vegetación $[9, 7, 2]$ en imagen izquierda.
Composición de los suelos $[10, 6, 2]$ en imagen derecha.

Para la primera combinación, el azul del visible combinado con el infrarrojo medio permite discriminar fácilmente los píxeles similares entre agua y vegetación. De hecho, la alta transmitancia del agua sirve de ayuda en la discriminación de profundidad de masas acuáticas, también presentes en la zona de estudio.

De cara a los suelos con poca vegetación permite un buen análisis del vigor de las masas vegetales, dada la alta reflectividad que se aprecia en la vegetación de regadío y de ribera. También aporta una ligera información sobre la temperatura debido a que la banda 10 tiene longitudes de onda en la frontera difusa entre el infrarrojo medio y el infrarrojo térmico, y esto

se refleja en que la capa del rojo se extiende por toda las coberturas de zona de estudio en la imagen. Sin embargo, como se aprecia no se puede distinguir entre matorral, regadío y ribera, es decir, la clasificación de la vegetación no es todo lo efectiva que podría ser.

Para un proceso similar, la segunda combinación aporta resultados más efectivos si son orientados a la composición mineralógica y litológica del suelo. Esto se nota en las cubiertas de las construcciones, en el color turquesa de los relieves en la esquina superior izquierda de la imagen.

La combinación de bandas $[R, G, B] = [7, 5, 3]$ considera sólo a la banda 7 del infrarrojo cercano (visualizada en rojo), modificando la visión del rojo como verde y la del verde como violeta. Esta configuración permite buena sensibilidad a la vegetación, distinguiéndose en la imagen la vegetación de ribera y regadío – rojo oscuro – de la de matorral – rojo claro –. Se aprecia mejor densidad de la vegetación y no se pierde la buena distinción vegetación-agua.

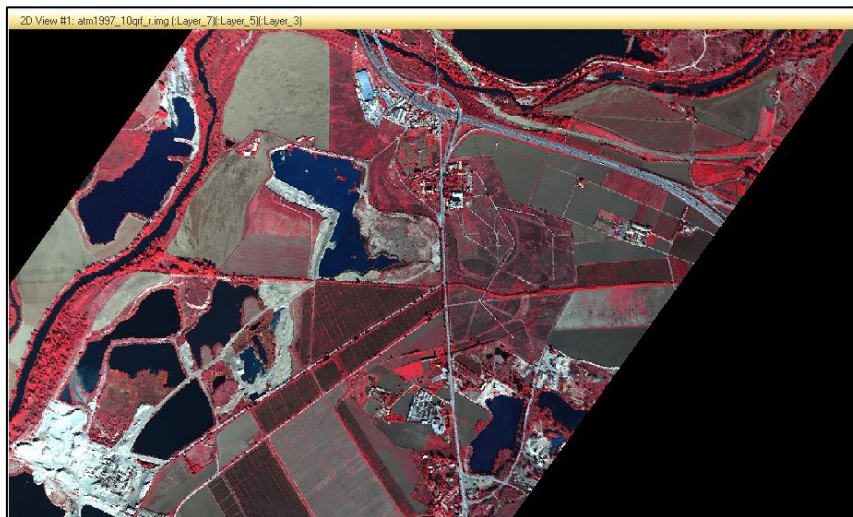


Figura 6.11 – Composición de vegetación en rojo $[7, 5, 3]$.

Para las masas acuáticas, la combinación más efectiva es $[R, G, B] = [7, 9, 10]$, es decir, el infrarrojo próximo, medio y térmico, respectivamente. En ésta composición, todas las masas de agua aparecen con el mismo color, debido a la posición de las bandas del IR próximo – que permite visualizar el agua – y el IR medio – que permite visualizar las demás cubiertas – y, que el IR *medio-térmico* no tiene valores referentes al agua.

Además, se aprecian las sombras en negro, debido a la banda del IR térmico, dándose una buena distinción entre éstas y las masas acuáticas. Se mantiene la información del vigor vegetal – en rojo si es mayor, en verde si es menor –.

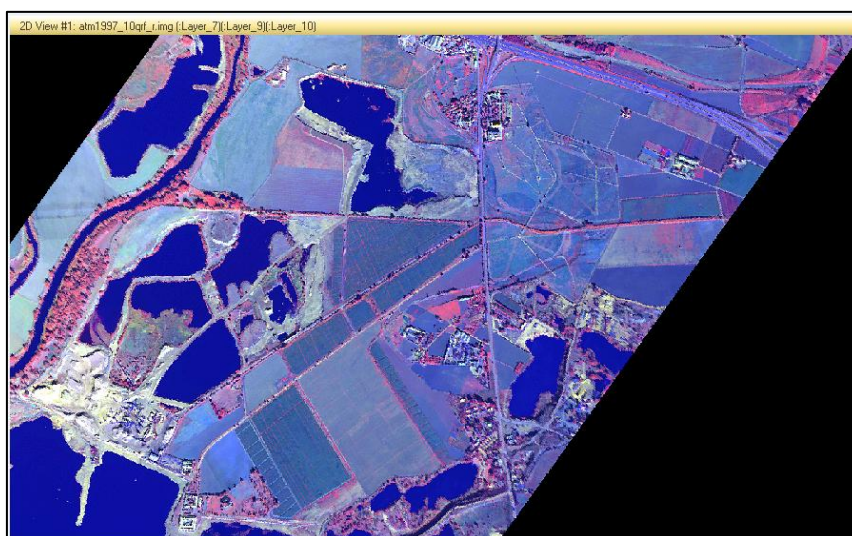


Figura 6.12 – Composición de masas de agua [7, 9, 10].

De la clasificación anterior, se puede deducir la clasificación de tierras en función de la humedad. Cambiando el orden de colocación de las bandas a $[R, G, B] = [10, 9, 7]$, se consigue otra distinción para el análisis de textura de las distintas clases de suelo, por ejemplo de arcillas, gravas, arenas, etc.

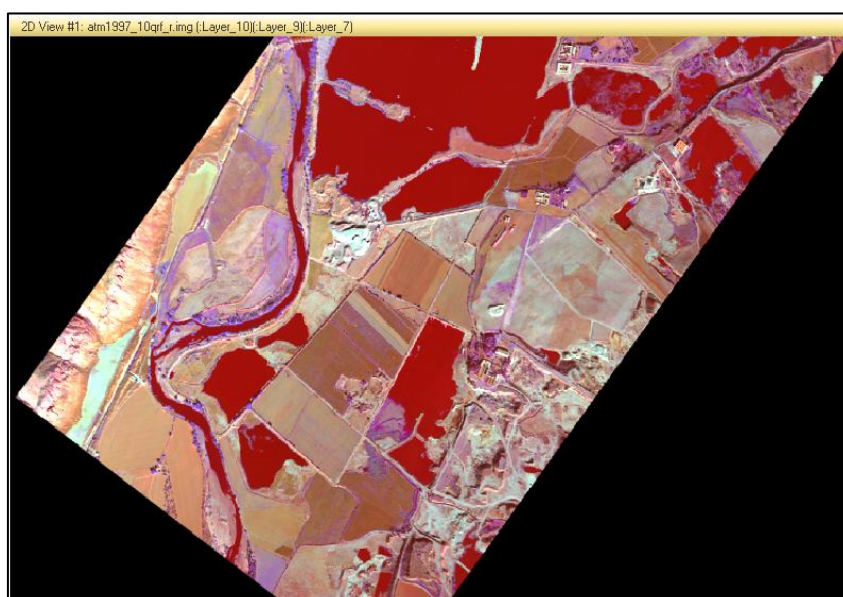


Figura 6.13 – Composición de tierra [10, 9, 7].

Dado que la zona es en gran parte calcárea y yesífera, una combinación para detectar materiales de este tipo por afloramientos, atendiendo a la reflectancia que tienen es $[R, G, B] = [10, 4, 1]$. En la figura 6.14, se muestra una comparativa de ésta respecto a la anterior combinación.

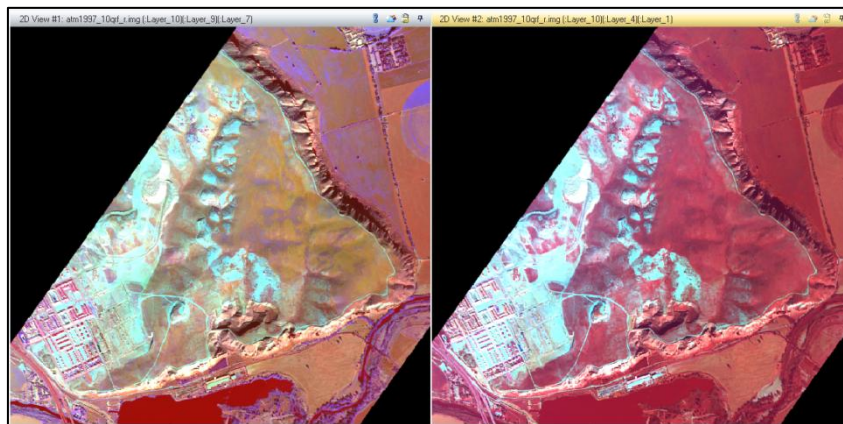


Figura 6.14 – Composición de tierra [10, 9, 7] a la izquierda.
Composición de tierra por reflectancia [10, 4, 1] a la derecha.

6.3 DEFINICIÓN DE POSIBLES CLASES EXISTENTES

Antes de proceder a realizar cualquier tipo de clasificación, es conveniente llevar a cabo un estudio previo de las posibles clases espectrales que pueden conformar la leyenda de los mapas finales. Este paso facilitará la realización de las posteriores clasificaciones.

Mediante la documentación sobre la geomorfología, geología y vegetación de la zona de estudio – capítulo 2 – existente en internet y en inventarios y bibliografías sobre la Comunidad de Madrid, junto a los análisis exploratorios realizados hasta el momento y la interpretación visual de la imagen, es posible definir una leyenda de clases espectrales presentes en la zona.

El primer paso ha sido definir dos grandes grupos de clases: usos artificiales y usos naturales, abordándose cada uno de manera independiente. A continuación, se analizan siete listados de información sobre la zona de estudio documentados y/o observados. Razonadamente, se agrupan en categorías genéricas que definan sus características.

Finalmente, se crea y se revisa una definición de la leyenda aproximada que se utilizará en el proceso de clasificación que se mostrará en un gráfico como resultado final.

- Ámbito de materiales por edades:

Cuaternario. Pleistoceno y Holoceno:

- Niveles de terrazas.
- Llanuras de inundación.
- Abanicos coluviales y aluviales.

Terciario. Neógeno:

- Yesos: masivos, tableados, nodulares.
- Arcillas: grises, marrones, verdes y rosadas.

- Margas: calcáreas, yesíferas, grises y verdes.
- Conglomerados.
- Arenas y areniscas.
- Calizas: tobáceas, margosas y dolomíticas.

Todos los materiales del terciario y los abanicos coluviales y aluviales se pueden catalogar como suelo desnudo. Más adelante se clasifica los materiales del cuaternario.

- Tipos básicos de explotación:
 - Canteras de ladera para la explotación de yeso.
 - Canteras de ladera para la extracción de áridos.
 - Graveras de ladera por encima del nivel freático.
 - Graveras por debajo del nivel freático.

Todos los tipos básicos de explotación entran en suelo desnudo. Las industrias entrarán en la categoría de zona urbana. Se considerarán los caminos que les rodeen dentro de caminos de tierra o carreteras.

- Vegetación autóctona:
 - Encinar manchego. Entra en la designación de vegetación autóctona.
 - Matorrales: coscojares, esplegueras, jabunales, ontinares, orgazales y albardinares. Entren en la designación de matorral.
 - Bosques de ribera. Entren en la designación de vegetación autóctona.
- Ecosistemas:
 - Llanuras de cereales con alternancia de cultivos y olivares.
 - Cortados y cantiles.
 - Sotos.
 - Graveras.

Las llanuras de cereales entran en la categoría de secano. Los cultivos y los olivares entran en la categoría de regadío. Las graveras y los cortados y cantiles entran en suelos desnudos y los sotos en categoría de vegetación autóctona.

- Unidades básicas geomorfológicas.
 - Vegas fluviales, incluidos cauce, llanuras de inundación y niveles de terraza.
 - Superficies de los páramos: glaciares de ladera y superficies de páramos.
 - Coluviales de cantiles y yesos.
 - Glaciares de vertiente.

- Unidades básicas de vegetación:
 - Sotos y riberas, que incluyen bosques caducifolios.
 - Vegetación de hojas perennes, por ejemplo, coscojares.
 - Espartales, romerales, jabunales y demás plantas de naturaleza mediterráneas.
 - Pinares de repoblación.
 - Cultivos de secano de cebada, trigo y girasol.
 - Cultivos de regadío, con grandes extensiones de alfalfa, espárragos y lechugas.
 - Jardines artificiales y vegetación ripícola.

Estas dos últimas unidades se pueden combinar para formar un solo grupo de clasificaciones.

- Combinación de unidades geomorfológicas y paisajísticas:
 - Sotos y riberas en las vegas fluviales.
 - Cultivos de regadío en las vegas fluviales.
 - Coscojales de la superficie de los páramos y glacis de vertiente.
 - Matorrales de la superficie de los páramos y glacis de vertiente.
 - Cultivos de secano en las superficies de los páramos y glacis de vertiente.
 - Cantiles y coluviales con vegetación ripícola.
 - Pinares de repoblación de los glacis de vertiente.
 - Paisaje antrópico.

A los glacis, los coluviales y las superficies de los páramos, se les designa la clase de suelos desnudos o con poca vegetación. Las vegas fluviales, en función del tipo de vegetación asignada, entrarán en categoría de vegetación autóctona, secano, regadío, matorral o suelos desnudos. El paisaje antrópico, junto a los jardines artificiales y la vegetación ripícola de los suelos urbanos, entra en la designación de categoría de regadío.

Se considera, dada la elevación solar en el momento de la toma de datos sobre la zona de estudio, las zonas de sombras como una categoría más. La finalidad de ello es minimizar los errores de clasificación espectral entre niveles digitales cercanos entre esta categoría y aquellas que tengan niveles digitales de bajo valor, como por ejemplo, vegetación de regadío o masas de agua. Así mismo, se considera una categoría “Sin imagen” para niveles digitales presentes en el marco de la imagen que no pertenezcan a ella.

El esquema de categorías de coberturas del suelo será el siguiente:

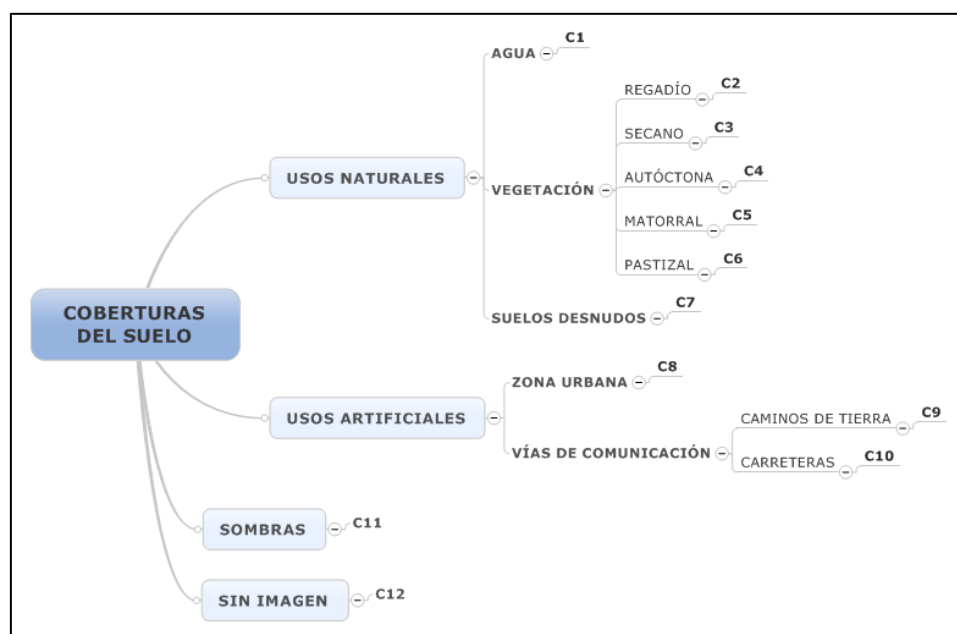


Figura 6.15 – Esquema de categorías consideradas inicialmente.

6.4 ANÁLISIS DE LAS CURVAS DEL VALOR DIGITAL DE LA IMAGEN

Una vez definidas las posibles clases existentes en la zona, es de interés realizar una revisión exploratoria de las curvas del valor digital o perfiles espectrales de la imagen realizada, tanto de forma razonada como por comparación espectral. Este análisis se ha efectuado sobre las clases citadas cuya ocupación en la zona de estudio es más evidente.

Para crear las curvas se ha utilizado el comando “Spectral Profile” en la pestaña “Multispectral” de la barra de herramientas del software, que abre el sistema cartesiano del mismo nombre y está configurado por defecto para crear el perfil de un determinado píxel perteneciente a un uso.

En el eje de abscisas de la grafica se muestra el número de bandas de la imagen de 0 a 10. En el eje de ordenadas, se muestran los valores de reflectancia en *tantos por ciento por cien*, dado que ERDAS trabaja con números enteros. Se han editado los colores de la leyenda de las curvas para su mejor distinción de categorías y se han ajustado los ejes de ordenadas, que venían dimensionados con valores de reflectancia entre -5000 y 25000, no adecuados para una imagen multispectral.

En la figura 6.16, se presenta un gráfico con el contenido de reflectancia para cada canal de los posibles usos y coberturas de la zona.

Se puede observar que la reflectancia de la vegetación autóctona hacia la banda 8 de infrarrojo cercano tiene un pico, como cabe de esperar, dada la baja absorción de las hojas. Por el contrario, la banda de la vegetación de secano es más suave en el infrarrojo y tiene reflectancia superior en el visible, lo que cabría esperar en la reflectancia, por ejemplo, de cereales. También

la baja reflectancia de las sombras, las cuales tienden a una ligera subida hacia la banda 10 del infrarrojo medio, que es la banda con frontera compartida con el térmico y, por tanto, da ligera información sobre la temperatura.

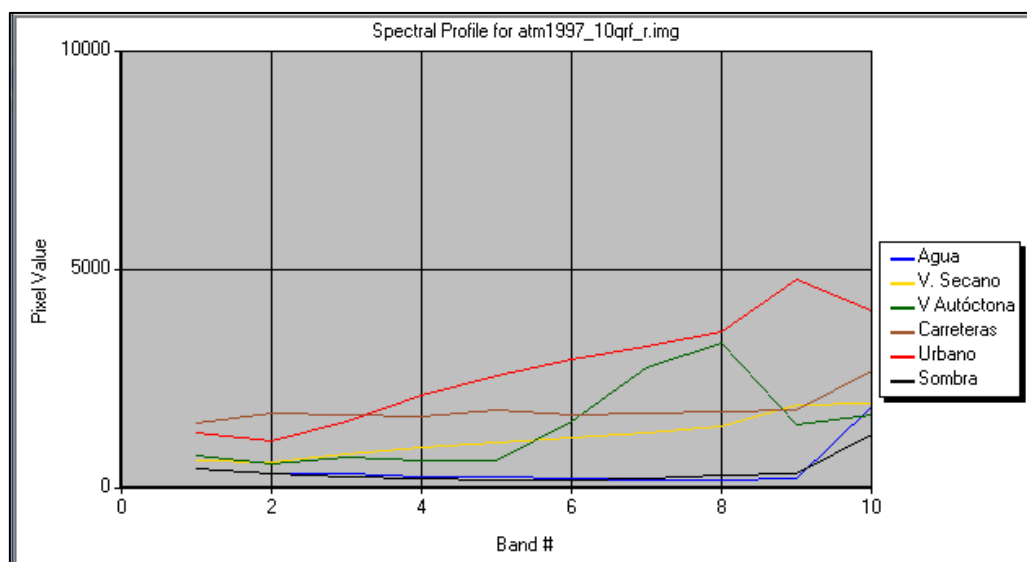


Figura 6.16 – Perfiles espectrales de los usos más extendidos en la imagen.

Los valores obtenidos se han analizado, además, de forma simultánea con la curva del valor digital asociada de referencia a partir de la librería espectral de ERDAS. Dentro del editor “Spectral Profile” se abren las librerías de las que ERDAS dispone en el botón “SpecView” de la pestaña “View”. ERDAS dispone de librerías espectrales, entre ellas la creada por el USGS. Se ha tomado la propia del software dado que las otras dos se centran en la reflectancia de componentes químicos y sólo es necesario comprobar que las curvas presentan reflectancias similares a las de referencia.

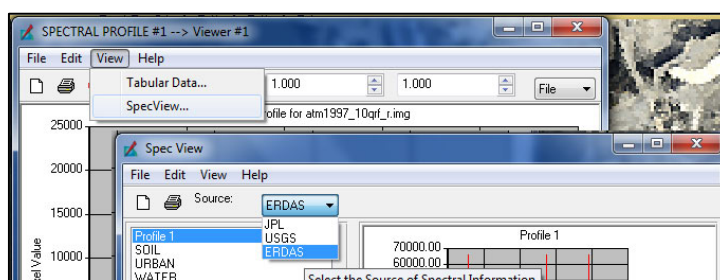


Figura 6.17 – Localización de las librerías espectrales en ERDAS IMAGINE.

En la figura 6.18 se muestran curvas de reflectancia del suelo, lo urbano y el agua. Los valores de reflectancia se muestran en valores de un nivel digital de un píxel en función del valor de la longitud de onda.

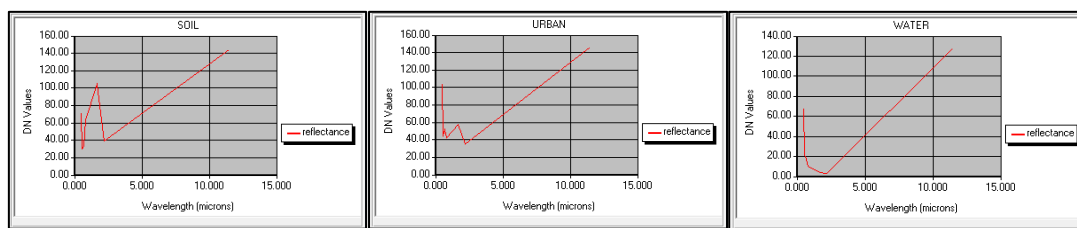


Figura 6.16 – Curvas de referencia de la librería de ERDAS.

Como conclusión en principio, se considera satisfactorio el análisis de los perfiles espectrales, puesto que se corresponden gráficamente con las curvas de la librería espectral de referencia.



7. CLASIFICACIÓN DE LA IMAGEN

7.1 CONCEPTO DE CLASIFICACIÓN

La finalidad de clasificar una imagen es la definición de los píxeles de dicha imagen en categorías que definan rasgos de interés de la superficie terrestre, por ejemplo: geomorfológicos, geológicos, vegetación, etc.

Por ello se define la clasificación digital como la obtención de una cartografía o inventario de las categorías objeto de estudio a partir de imágenes espectrales, multiespectrales o hiperespectrales. Es decir, se trata de una etiqueta que identifica la categoría asignada a cada píxel.

Una clasificación no es una actuación absoluta, sino más bien una caracterización particular válida para una imagen determinada y un territorio determinado.

Como se ha citado, anteriormente, la clasificación de la imagen se realiza en 3 fases:

- Fase de entrenamiento: Donde se definen digitalmente las clases o categorías a discriminar.
- Fase de asignación: En la que el ordenador asigna una categoría a cada uno de los píxeles de la imagen.
- Fase de comprobación y verificación de resultados: El analista comprueba que los resultados son correctos.

7.2 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

Es el primer tipo de clasificación de imágenes. En la clasificación, el proceso de categorización de los píxeles está supervisado por el analista; es decir, el usuario delimita las zonas que asigna a cada categoría. A éstas se les denomina “áreas de entrenamiento”.

Para cada categoría se deben seleccionar varias zonas dentro del área de estudio.

Finalizada esta selección, el ordenador calcula las estadísticas elementales de cada categoría a partir de los niveles digitales de todos los píxeles incluidos en las áreas de entrenamiento, aplicando el proceso a todas las bandas que aportan información de un píxel.

7.2.1 FASE DE ENTRENAMIENTO

El proceso de análisis visual de la imagen, realizado en el apartado 6, complementa la fase de entrenamiento. En esta fase, se selecciona una muestra de píxeles de la imagen que representarán adecuadamente las categorías de interés. En conjunto, el realizar cuidadosamente un proceso de análisis visual con un muestreo de datos muy aproximado, es esencial para realizar esta fase con éxito.

En la fase de entrenamiento se distinguen dos tipos de clases:

- Clases informacionales: Son las que constituyen la leyenda del trabajo que pretende deducir el intérprete.
- Clases espectrales: Corresponden a los grupos de valores espectrales homogéneos dentro de la imagen – en función de ofrecer una reflectividad similar –, para las bandas consideradas y la fecha de la imagen.

Ambas clases se corresponden entre sí de modo que, a una clase informacional, puede corresponderle una o varias clases espectrales y no sucediendo así a la inversa.

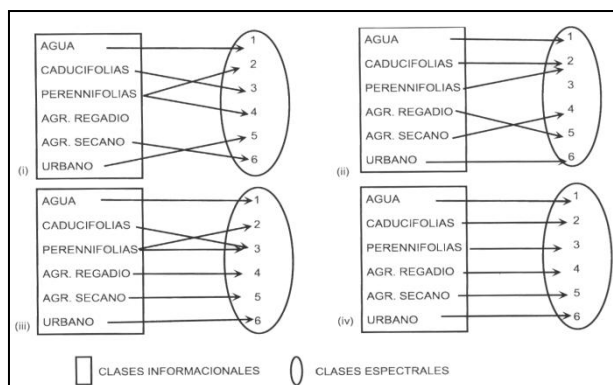


Figura 7.1 – Relación entre clases informacionales y espectrales.

Lo primero que se llevó a cabo fue el establecimiento de una leyenda de las clases temáticas presentes en la imagen. Para ello es necesario el conocimiento de la zona de estudio.

Se ha tratado ese conocimiento en el apartado 6 de análisis visual, a partir de documentos desarrollados sobre inventarios de la zona de estudio, información y bases de datos de imágenes sobre la zona de estudio, y técnicas de fotointerpretación.

De este modo, se ha podido definir una leyenda inicial con 12 clases espectrales: siete de usos naturales, tres de usos artificiales, y dos clases de prevención de errores en la clasificación. A continuación, se presentan las clases espectrales junto a su respectivo uso – o cobertura – al que representen:

- Clase 1 [Agua].
- Clase 2 [Regadío].
- Clase 3 [Secano].
- Clase 4 [Vegetación autóctona].
- Clase 5 [Matorral].
- Clase 6 [Pastizal].
- Clase 7 [Suelos desnudos].
- Clase 8 [Zona Urbana].
- Clase 9 [Caminos de tierra].
- Clase 10 [Carreteras].
- Clase 11 [Sombras].
- Clase 12 [Sin imagen].

Análisis de las estadísticas de las clases espectrales

Es preciso evaluar la viabilidad de que las categorías puedan clasificarse sin grave riesgo de error. Si se comprueba que dos o más clases son muy similares, habría una gran probabilidad de confusión entre ellas. Entonces, se debería proceder como sigue:

- Confirmar que las estadísticas de entrenamiento han sido correctamente deducidas.
- Adoptar una leyenda más general, con nuevas categorías que supongan una mezcla de las que ofrecen mayor riesgo de confusión.
- Recabar información auxiliar o imágenes de otras fechas.

Siguiendo el procedimiento del apartado 6.4, se han añadido las clases temáticas en los perfiles espectrales, con excepción de la clase 12 – “Sin imagen” –. Se han revisado varias gráficas de perfiles en distintas zonas de la imagen, de las que se muestra una a continuación:

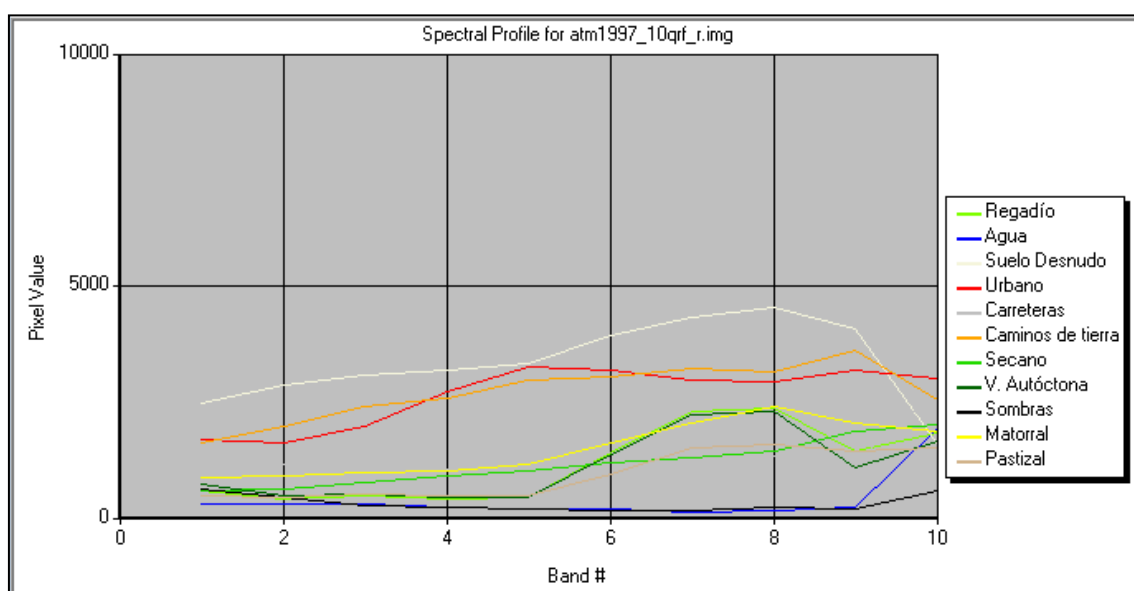


Figura 7.2 – Reflectancia de las distintas categorías.

Las estadísticas de entrenamiento están construidas por el valor medio de reflectancia para cada banda y por la desviación típica, que se refiere al grado de homogeneidad que aparece en torno a ese valor central – si dicho valor es muy alto, habrá una gran diversidad de valores y es más difícil de clasificar, ya que probablemente ofrezca solape con otras categorías.

Al realizar los perfiles espectrales, se observa si las líneas que los conforman son paralelas o próximas entre sí – solape entre categorías – o se cruzan – bandas donde es más probable separar las categorías. Entonces, las clasificaciones que en un principio se daban por válidas, empiezan a generar discusión debido a que, aunque la mayoría de los perfiles se corresponden con los referentes de las librerías espectrales, algunos tienen clases espectrales con curvas no secantes entre sí y pueden llevar a problemas de clasificación.

Revisando detenidamente las gráficas, la mayor variación se encuentra en la banda 8. Los perfiles aproximadamente paralelos entre sí son los correspondientes a las categorías “Caminos

de tierra” y “Suelo desnudo”, con la única intersección en torno a la banda 10, que se podría interpretar desde el punto de vista de la información que ofrece esa banda sobre la temperatura de la zona registrada en el momento de paso del avión. Probablemente genere problemas.

Así también, se ha observado un ligero paralelismo general entre los perfiles “Urbano”, “Matorral” y “Secano” y “Pastizal”. Dependiendo de la información de vigor vegetal que ofrezca el píxel escogido sobre la zona de estudio, se generará también paralelismo entre “Regadío” y “V. Autóctona”. Situación que también se considerará más adelante, en la fase de asignación.

Por lo demás, en zonas mejor divididas espectralmente, se observan sucesivas intersecciones entre las demás clases.

7.2.2 FASE DE ASIGNACIÓN

En esta fase se describirá el proceso operativo a seguir en las asignaciones de clases y en las clasificaciones de la imagen. En esta fase, el ordenador evalúa los patrones espectrales utilizando reglas de decisión, predefinidas matemáticamente para determinar la identidad de cada píxel, o *criterios de asignación*. Todos cumplen con definir un área de dominio en torno a la categoría a analizar.

Los criterios de asignación se dividen en dos tipos:

- Criterios paramétricos: aquellos en que los niveles digitales no se distribuyen normalmente. Los más conocidos son el algoritmo de Mínima Distancia (generalmente, la distancia es euclidiana) y algoritmo de paralelepípedo.
- Criterios paramétricos: aquellos en que los niveles digitales sí se distribuyen normalmente. El más representativo es el algoritmo de máxima probabilidad.
- Criterios mixtos de asignación: asignación por una regla no paramétrica seguida de una regla paramétrica, para clases espectrales de pertenencia difusa. Por ejemplo, asignación inicial por paralelepípedo seguida de máxima probabilidad.

PROCESO DE ASIGNACIÓN INICIAL DE CLASES

El proceso de clasificación supervisada realizado con ERDAS IMAGINE por el mejor método se detalla a continuación.

- Sobre la imagen se ha creado y guardado un área de interés, que servirá para guardar los conjuntos de píxeles que definan las clases espectrales y el marco de la imagen que se desee clasificar. El área se ha llamado “atm1997_10_qrfr_areausos”.
- Se ha ejecutado el cuadro de dialogo de la herramienta de edición de asignación “Signature Editor”, que se encuentra en el despegable “Supervised” de la pestaña “Raster” sobre la barra de herramientas.

- Debe definirse previamente el número de píxeles que determinará una clase espectral, en función del píxel semilla. Para ello, se ha creado un AOI por cada píxel semilla a identificar digitalizando su grupo a través de la herramienta “Polygon” – figura 7.4 – y, a continuación, añadiéndolo al editor a partir del botón “Create New Signature(s) from AOI”.

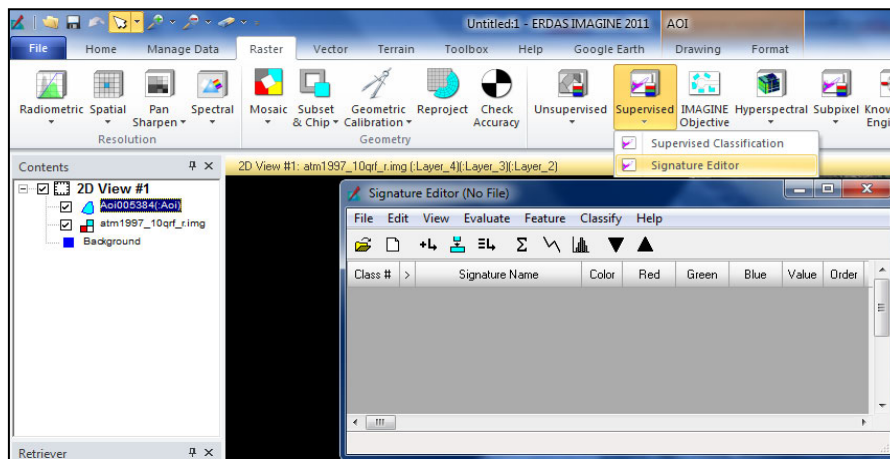


Figura 7.3 – Cuadro de diálogo de clasificación supervisada en ERDAS.

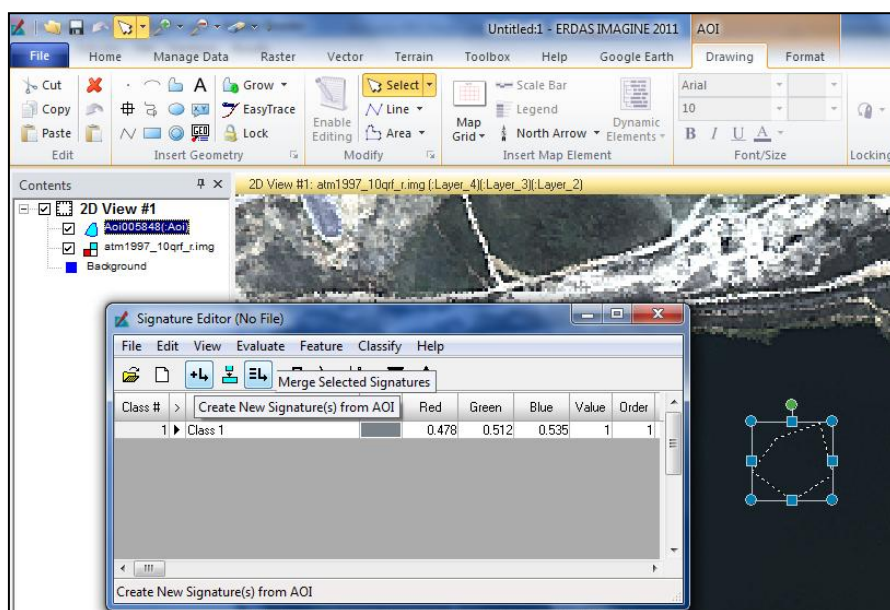
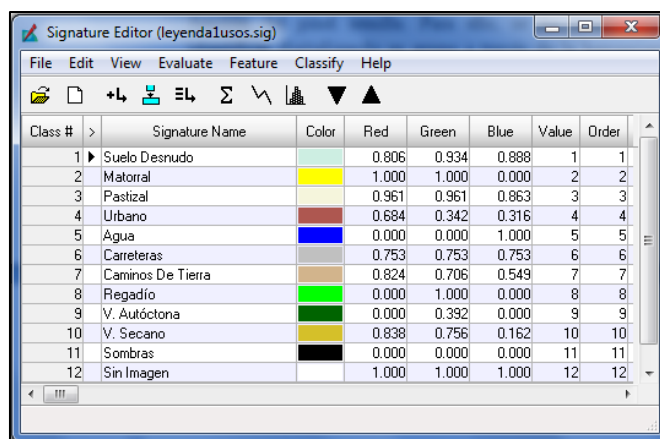


Figura 7.4 – Selección del píxel semilla del agua y categorización.

- Una vez hecha la leyenda, se ha asociado a la imagen mediante la herramienta “Image Association” del desplegable “Edit” en la barra de herramientas del “Signature Editor”. Se ha dibujado, además, el perímetro de la imagen para que el programa la considere por área de actuación.

En la figura 7.5, se muestra un cuadro con la leyenda que se ha guardado, una vez creada, “Leyenda1Usos” en la carpeta de la imagen, de modo que se pueda utilizar varias veces con los distintos clasificadores.



Class #	Signature Name	Color	Red	Green	Blue	Value	Order
1	Suelo Desnudo		0.806	0.934	0.888	1	1
2	Matorral		1.000	1.000	0.000	2	2
3	Pastizal		0.961	0.961	0.863	3	3
4	Urbano		0.684	0.342	0.316	4	4
5	Agua		0.000	0.000	1.000	5	5
6	Carreteras		0.753	0.753	0.753	6	6
7	Caminos De Tierra		0.824	0.706	0.549	7	7
8	Regadío		0.000	1.000	0.000	8	8
9	V. Autóctona		0.000	0.392	0.000	9	9
10	V. Secano		0.838	0.756	0.162	10	10
11	Sombras		0.000	0.000	0.000	11	11
12	Sin Imagen		1.000	1.000	1.000	12	12

Figura 7.5 – Leyenda con la clasificación inicial.

DISCUSIÓN DEL PROCESO DIGITAL DE EJECUCIÓN

Realizar una clasificación supervisada de una imagen con tantas clases espectrales, lleva al replanteo de la leyenda. En este apartado se muestra la fase de asignación desde el ordenador, con resultados no esperados y las correcciones de leyendas realizadas hasta la decisión final.

Para la clasificación, se ha abierto el cuadro de diálogo “Supervised Classification” del desplegable “Supervised” en la pestaña “Raster”. La primera regla utilizada es la de paralelepípedo, con clasificación por orden si hay solapamiento de píxeles y no clasificación para píxeles que no entren dentro de los límites. Se ha introducido la leyenda creada y se ha nombrado el fichero de salida como “atm1997_10qfr_csp1”

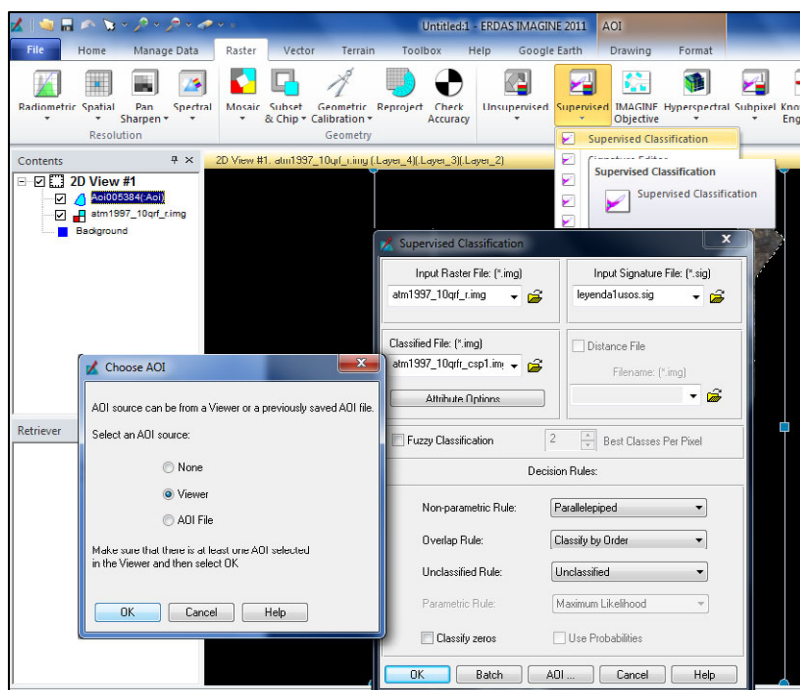


Figura 7.6 – Clasificación por paralelepípedo.

Seguidamente se ha hecho una segunda clasificación mixta por los mismos pasos, es decir, por paralelepípedo con asignación por máxima probabilidad si hay píxeles que caen en varios paralelepípedos – Overlap Rule: Parametric Rule, Parametric Rule: Maximum Likelihood –. El fichero de salida se ha llamado “atm1997_10qrfr_csp2”.

Como se muestra a continuación, a simple vista se observa que no se ha realizado una clasificación satisfactoria. En la figura izquierda – clasificación por paralelepípedo – categóricamente ha llamado “Urbano” o “Matorral” a casi todas las clases de suelo. En la figura derecha – clasificación mixta –, ha distinguido en más categorías, pero aún con todo, no considera las categorías de “Agua” o de “Secano” correctamente. Se descartan, ambas metodologías.

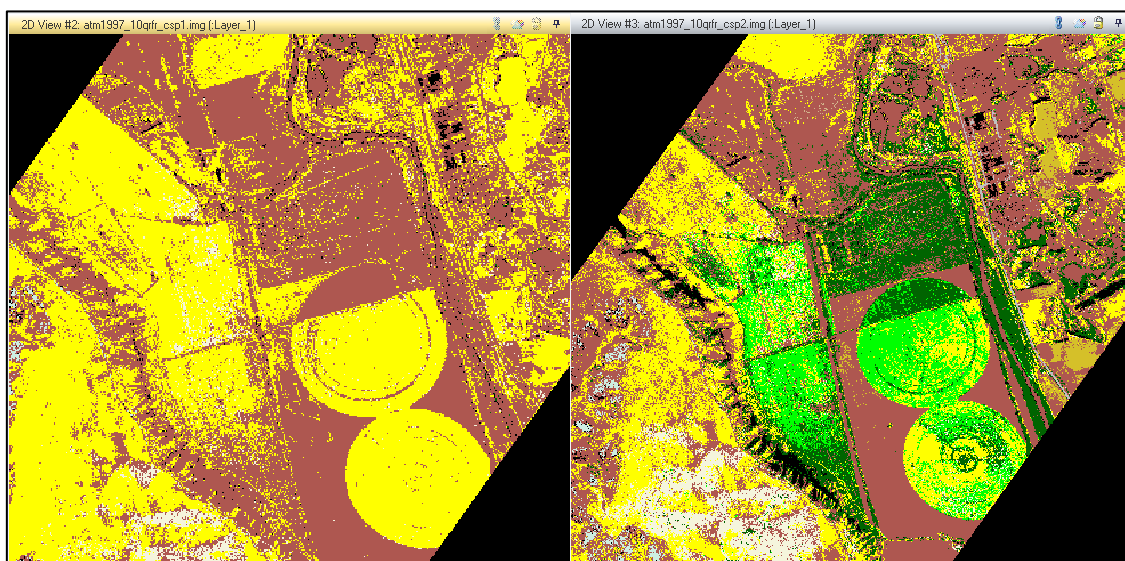


Figura 7.7 – Resultado de clasificación por paralelepípedo [izquierda].
Resultado de clasificación por paralelepípedo y máxima probabilidad [derecha].

Se ha probado con las siguientes reglas de clasificación: mínima distancia con asignación final de píxeles que pertenezcan a varias categorías por mínima distancia – imagen izquierda – y regla paramétrica de máxima probabilidad con elección entre dos de las mejores clases para consideración de varias clases por probabilidad de pertenencia – imagen derecha –. Los ficheros correspondientes se han llamado “atm1997_10qrfr_csmd1” y “atm1997_10qrfr_csmp1” – este último, se visualiza desde la opción “Display as Pseudo Color”.

Ambas clasificaciones, no han respetado ciertas categorías. Revisando la imagen por mínima distancia, se aprecia mala distinción entre sombras y agua. Sin embargo, a efectos de mayor error de clasificación, la de regla de máxima probabilidad es la peor clasificación dado que los errores son groseros. Por ejemplo, el agua del curso fluvial aparece en la categoría de “Urbano”.

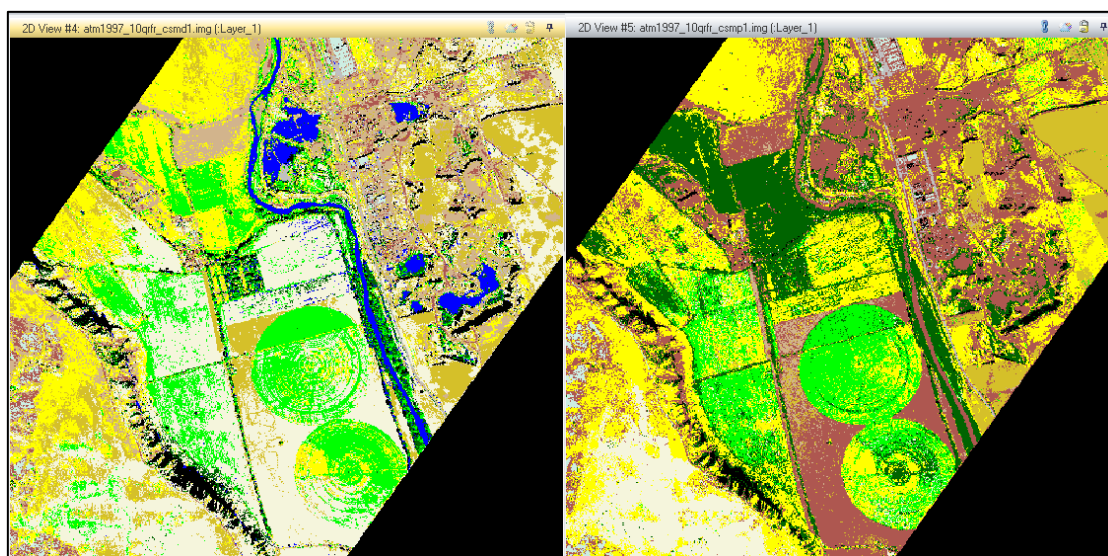


Figura 7.8 – Resultado de clasificación por mínima distancia [izquierda].
Resultado de clasificación por máxima probabilidad [derecha].

Se han descartado los tres resultados. El problema real es que una sola categoría puede tener hasta cinco o seis clases espectrales.

La siguiente opción evaluada, para las clases informacionales con más de una sola clase espectral, ha sido crear una clase espectral por cada variación. Se ha seleccionado el total del conjunto y se ha fusionado éste total de clases pertenecientes a una categoría.

Se ha realizado de forma similar a la descrita anteriormente, con la diferencia que para la unificación de clases espectrales, se ha utilizado la herramienta “Merge Selected Signatures” del cuadro de diálogo “Signature Editor”, nombrando la clase resultante con su denominación temática.

Se han encontrado problemas técnicos en la categoría de “Urbano”. Debido a las limitaciones técnicas del programa y a la gran diferencia entre los ND en una misma clase, no se ha podido realizar una unificación de clases mediante “Merge Selected Signatures”, por lo que se han creado varias subcategorías referentes a suelo urbanizado para una posterior evaluación de resultados. Las categorías creadas son “Edificaciones”, “Municipal”, “Industrial1” e “Industrial2”.

Se muestra a continuación la segunda leyenda editada, que se ha guardado en la carpeta de entrada como “Leyenda12clases”. El área de interés asociada se ha llamado “atm1997_10qrfr_areaclases”

En la figura 7.10, se muestra los primeros resultados por paralelepípedo y por paralelepípedo simultáneamente con máxima probabilidad. Los ficheros resultantes se han llamado, respectivamente, “atm1997_10qrfr_2csp1” y “atm1997_10qrfr_2csp2”.

Signature Editor (leyenda12clases.sig)

File Edit View Evaluate Feature Classify Help

Class #	Signature Name	Color	Red	Green	Blue	Value	Order
1	Class 1		0.628	0.760	0.770	1	1
2	Class 2		0.478	0.514	0.540	2	2
3	Class 3		0.715	0.876	0.860	3	3
4	Class 4		0.511	0.603	0.586	4	4
5	Class 5		0.533	0.561	0.560	5	5
6	Agua		0.000	0.000	1.000	6	6
7	Class 6		0.628	0.657	0.632	7	7
8	Class 7		0.640	0.672	0.683	8	8
9	Vegetación de Regadío		0.498	1.000	0.000	9	9
10	Class 8		0.789	0.752	0.719	10	10
11	Class 9		0.853	0.824	0.815	11	11
12	Vegetación de Secano		1.000	1.000	0.000	12	12
13	Vegetación Autóctona		0.000	0.392	0.000	13	13
14	Matorral		0.824	0.706	0.549	14	14
15	Pastizal		1.000	1.000	0.878	15	15
16	Class 10		1.000	1.000	1.000	16	16
17	Class 11		1.000	1.000	1.000	17	17
18	Suelo Desnudo		0.627	0.322	0.176	18	18
19	Edificaciones		1.000	0.714	0.757	19	19
20	Municipal		0.690	0.188	0.376	20	20
21	Industrial1		0.627	0.125	0.941	21	21
22	Industrial2		0.933	0.510	0.933	22	22
23	Camino De Tierra		0.639	0.621	0.161	23	23
24	Carreteras		0.753	0.753	0.753	24	24
25	Sombras		0.000	0.000	0.000	25	25

Figura 7.9 – Leyenda modificada considerando las clases espectrales.

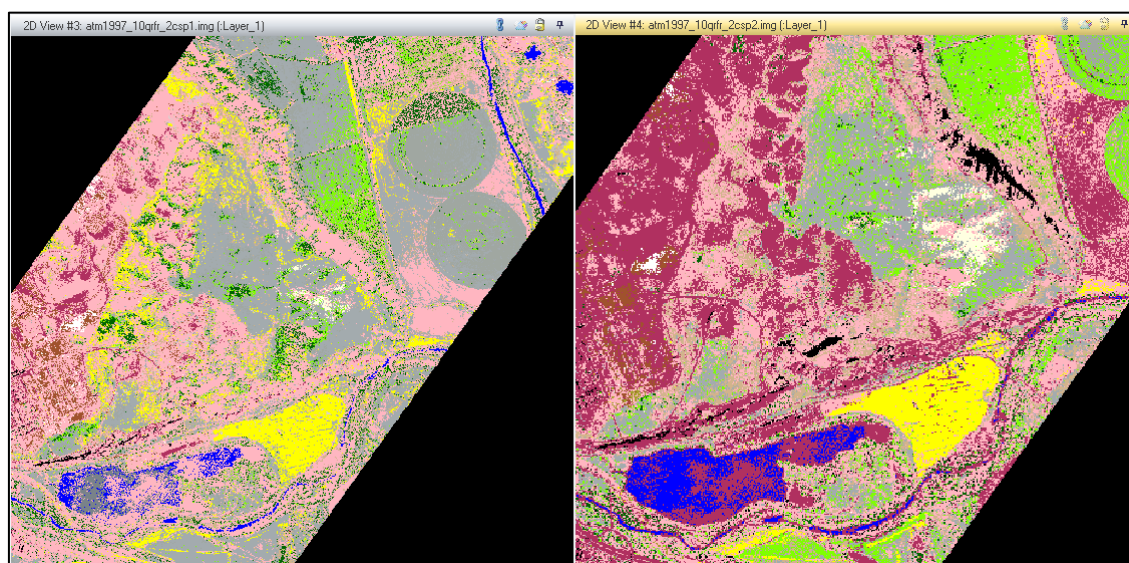


Figura 7.10 – Segundo resultado de clasificación por paralelepípedo [izquierda].
Segundo resultado de clasificación por paralelepípedo y máxima probabilidad [derecha].

Como se puede apreciar, el software no resuelve bien la clasificación uniendo clases en una sola. Aún así, se puede notar la diferencia que la regla no paramétrica – paralelepípedo, imagen izquierda – y la regla mixta – paralelepípedo y mínima distancia, imagen derecha – generan sobre las clases espectrales, siendo más destacable la regla mixta que respeta, por ejemplo, clases espectrales como las de la categoría “Agua” y “Secano”; y más descartable, en consecuencia, la regla no paramétrica.

Del mismo modo, se ha procedido, como se muestra en la figura 7.11, la configuración para la nueva clasificación por mínima distancia, cuyo fichero de salida se ha llamado “atm1997_10qfr_csmd2”; y, finalmente, para máxima probabilidad, cuyo fichero se ha llamado “atm1997_10qfr_csmp2” que se visualiza en la capa 1 de pseudo color.

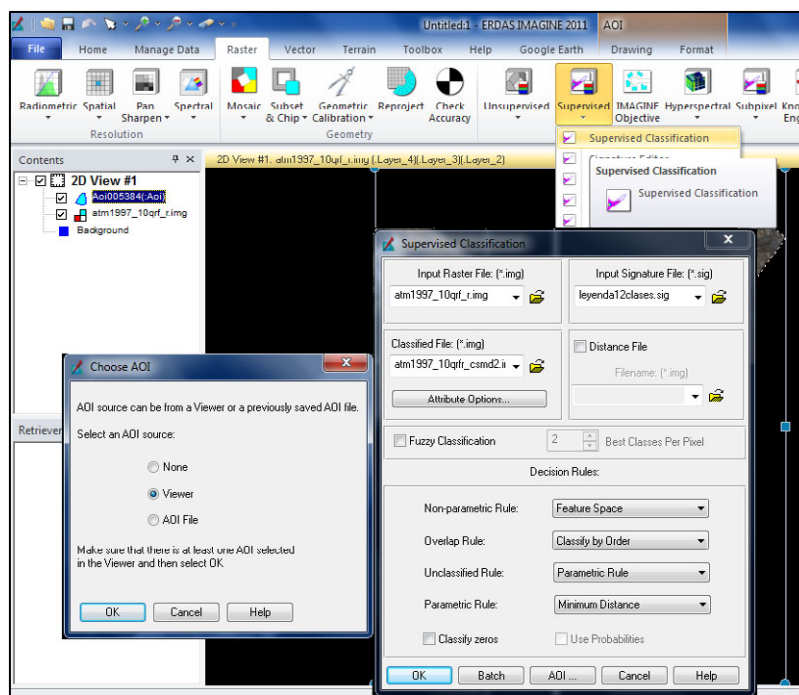


Figura 7.11 – Clasificación por mínima distancia.

Puede observarse en la figura 7.12 que, por segunda vez, ambos resultados son mejores clasificaciones respecto a la de regla de decisión por paralelepípedo y la de regla mixta. Respecto a las clases espectrales, la mínima distancia respeta más la variedad de clases, y respecto a asignación final, es mejor la regla de máxima probabilidad. Sin embargo, aunque de cara a una buena asignación espectral, el mejor resultado es el de mínima distancia, ambos resultados no son lo suficientemente satisfactorios y todavía tienen errores de clasificación groseros.

Por no ofrecer, a primera vista, los resultados esperados, se ha propuesto una solución nueva, basada en asignar varias clases espectrales, sin unificarlas entre sí. Se ha evaluado la fidelidad de los resultados correspondiendo con las clases espectrales y, finalmente, se ha realizado una clasificación temática de la leyenda. El problema de la clasificación supervisada, es que un píxel semilla no es suficiente para definir las distintas clases espectrales que pueden pertenecer a una misma clase informacional cuando se trata de una imagen de muy alta resolución como ésta. Por eso se han creado, siguiendo los pasos descritos en la primera clasificación, semillas de todas las clases espectrales sin unificarlas, llamándolas como su genérica y numerándolas.

El área de interés asignada a la leyenda, se ha llamado “atm1997_10qfr_areace”. La leyenda se ha denominado como “Lcel”. La leyenda creada se muestra en la figura 7.13



Figura 7.12 – Segundo resultado de clasificación por mínima distancia [izquierda].
Segundo resultado de clasificación máxima probabilidad [derecha].

Signature Editor (Ice1.sig)							
File Edit View Evaluate Feature Classify Help							
Class #	Signature Name	Color	Red	Green	Blue	Value	Order
1	Agua1		0.174	0.796	0.826	1	1
2	Agua2		0.000	1.000	1.000	2	2
3	Agua3		0.163	0.233	0.837	3	3
4	Agua4		0.212	0.561	0.788	4	4
5	Agua5		0.714	0.875	0.861	5	5
6	V. Regadio1		0.358	0.922	0.530	6	6
7	V. Regadio2		0.403	0.877	0.648	7	7
8	V. Regadio3		0.513	0.895	0.385	8	8
9	V. Secano1		0.837	0.767	0.163	9	9
10	V. Secano2		0.871	0.754	0.129	10	10
11	V. Secano3		0.879	0.832	0.121	11	11
12	Suelo desnudo1		0.774	0.766	0.586	12	12
13	Suelo desnudo2		0.813	0.798	0.547	13	13
14	Suelo desnudo3		0.894	0.915	0.725	14	14
15	V. autóctona		0.000	0.392	0.000	15	15
16	V. Pastizal		0.824	0.706	0.549	16	16
17	Urbano1		0.690	0.188	0.376	17	17
18	Urbano2		0.826	0.234	0.317	18	18
19	Urbano3		0.729	0.210	0.131	19	19
20	Urbano4		0.930	0.560	0.510	20	20
21	Urbano5		0.677	0.183	0.189	21	21
22	Matorral		0.461	0.339	0.342	22	22
23	Carreteras		0.753	0.747	0.750	23	23
24	Camino de tierra		1.000	0.647	0.000	24	24
25	Sombras		0.000	0.000	0.000	25	25
26	V. Secano4		0.872	0.849	0.488	26	26
27	V. Secano5		0.905	0.810	0.655	27	27
28	Sin Imagen		1.000	1.000	1.000	28	28

Figura 7.13 – Leyenda modificada numerando las clases informacionales.

A continuación, se muestra la primera capa de resultados obtenida – imagen izquierda –, correspondiente a la clasificación por regla de decisión de paralelepípedo. A su lado se muestra la comparativa con la regla de decisión mixta, por paralelepípedo y máxima probabilidad. Definitivamente, se observa de modo visual que la regla de decisión por paralelepípedo es descartable, dado que engloba muy groseramente las clases vegetacionales y no considera clases espectrales respectivas masas de agua. Tampoco considera las sombras tanto como la regla

mixta. Esta última, da una mejor distinción de ciertos elementos, como “Urbano” o “Matorral”, sin embargo, sigue sin ser efectiva para espectralidades como el agua.

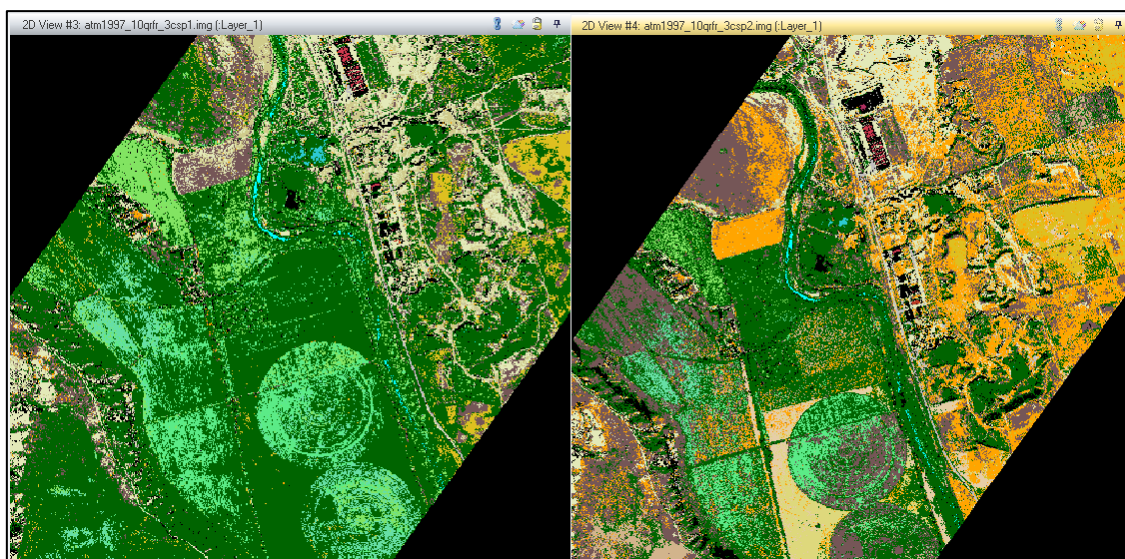


Figura 7.14 – Tercer resultado de clasificación por paralelepípedo [izquierda].
Tercer resultado de clasificación por paralelepípedo y máxima probabilidad [derecha].

Se ha continuado con la misma línea de trabajo para las siguientes clasificaciones: mínima distancia y máxima probabilidad. En la figura 7.15, se muestra el procedimiento para esta última regla de decisión, que se visualiza en pseudo color, en la capa 1 de las dos que ofrece.

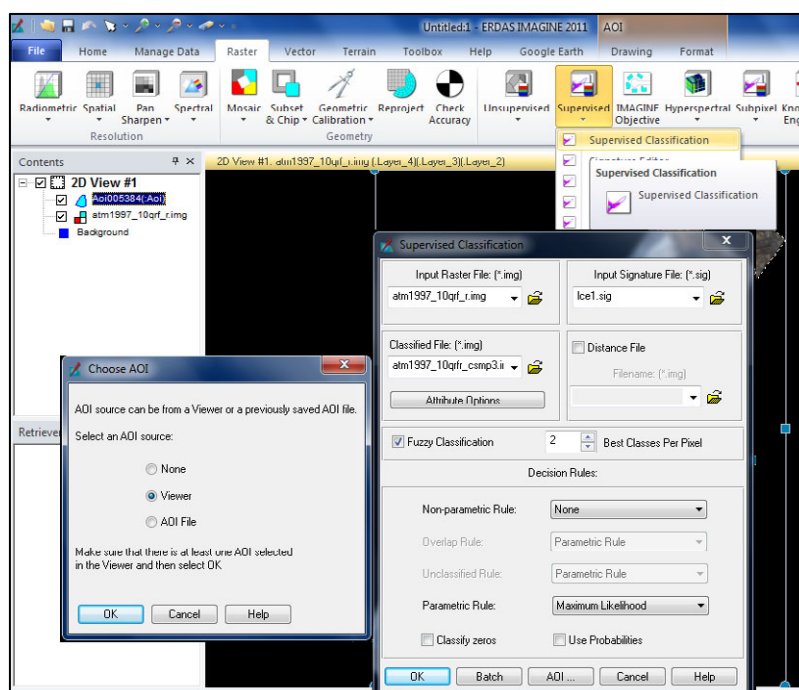


Figura 7.15 – Clasificación por máxima probabilidad.

Como se puede apreciar a continuación, para ambas reglas se siguen ofreciendo los mejores resultados visuales de clasificación. En este particular, el mejor ejemplo de efectividad para clasificación de masas de agua lo ofrece la regla de mínima distancia; por el contrario, la mejor regla para discriminación de coberturas de suelo viene aportada por la regla de máxima probabilidad.



Figura 7.14 – Tercer resultado de clasificación por mínima distancia [izquierda].
Tercer resultado de clasificación por máxima probabilidad [derecha].

Como conclusión se puede afirmar que la última propuesta de clasificación supervisada es la mejor entre las tres ofrecidas, por tanto, los resultados respectivos se utilizarán en la fase de comprobación. En función del mejor resultado, se evaluará una definición temática de la leyenda para el mismo, obteniendo la imagen final.

7.2.3 FASE DE COMPROBACIÓN DE RESULTADOS

La fase de comprobación de un mapa temático se realiza en dos fases: visualmente y matemáticamente. La parte visual ya se ha analizado, mayormente, en el apartado anterior, describiendo las situaciones de las capas resultantes y definiendo la mejor a efectos de fidelidad temática. Sólo quedan por evaluar los archivos temáticos escogidos de un modo matemático mediante matrices de confusión, y elegir el más representativo para cumplir el objetivo buscado.

Matriz de confusión

La matriz de confusión es el instrumento matemático que permite obtener confianza a partir de la evaluación de la exactitud sobre las categorías establecidas en las imágenes clasificadas, de modo que éstas se puedan evaluar de una forma fiable allí en los píxeles que de forma visual no se pueden evaluar correctamente.

Se lleva a la práctica mediante la herramienta “Accuracy Assessment” del desplegable “Supervised” en la pestaña “Raster” de la barra de herramientas de ERDAS.

Primer Resultado

Se describe el proceso seguido para el primero de los cuatro archivos, “atm1997_10qrfr_3csp1”, obtenido por regla de decisión del paralelepípedo. Posteriormente, se mostrarán los resultados para los demás archivos. Este proceso, una vez abierto el cuadro de diálogo “Accuracy Assessment” es el siguiente:

- Mediante el comando “Open” del desplegable “File” del menú de la barra de herramientas, se selecciona el archivo resultante de la clasificación.
- Se selecciona el visor con el archivo desde el comando “Select Viewer” desde el desplegable “View”.

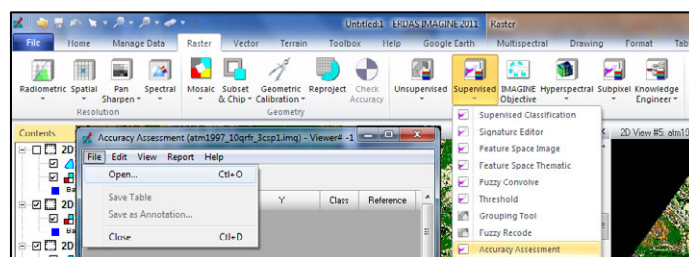


Figura 7.15 – Apertura de la matriz de confusión en ERDAS IMAGINE.

- No se dispone de puntos medidos de la imagen para la evaluación. Por ello, se han creado puntos para la evaluación mediante el comando “Create/Add Random Points”. Se ha creado una muestra aleatoria de 119 puntos de evaluación, que se obtengan homogéneamente desde todas las clases.

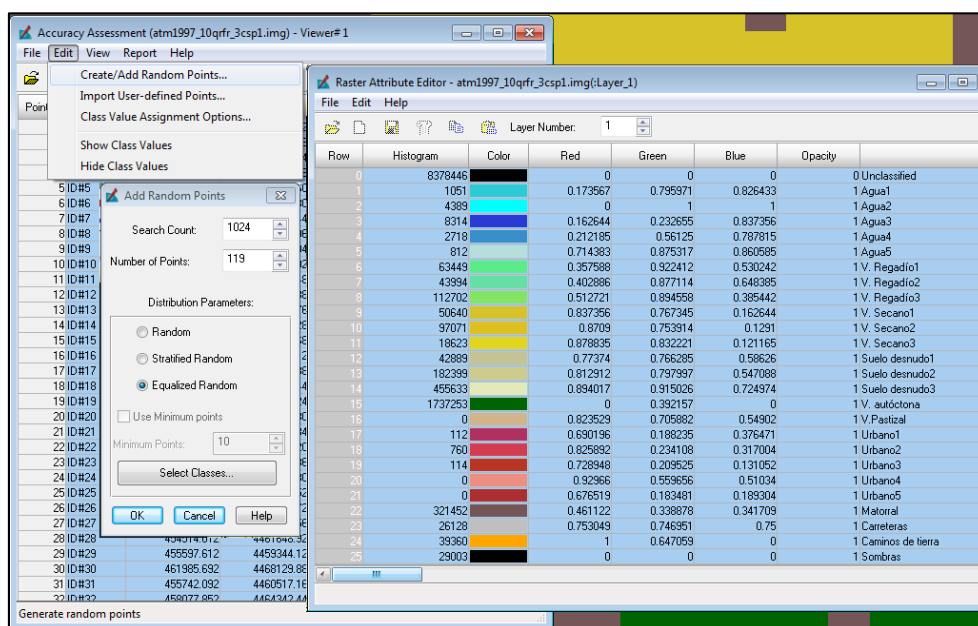


Figura 7.16 – Generación de los puntos de evaluación.

- Al crearse los puntos, se muestran las clases a las que pertenecen desde el comando “Show Class Values” del desplegable “Edit”. Para la evaluación de la matriz, se ha necesitado un valor de referencia, dato no disponible. Así que, mediante fotointerpretación de imágenes por composición coloreada, se han dado valores de clase a los píxeles. Posteriormente, se han guardado los datos de puntos y de esos valores de referencia en formato “txt”, con los nombres “puntos_mc” y “ce_referencia” respectivamente, para aplicarlos a los restantes 3 archivos de imagen clasificada.

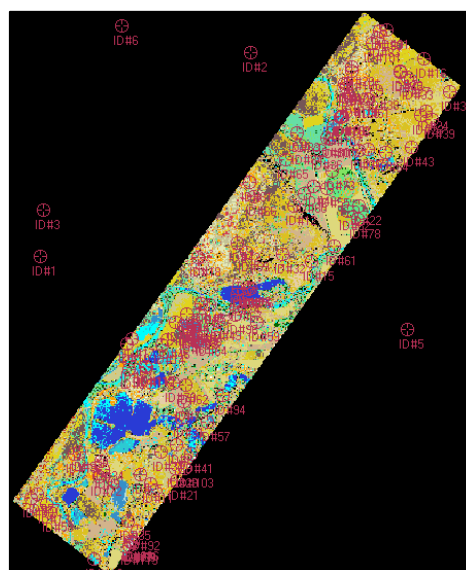


Figura 7.17 – Repartición de los puntos creados.

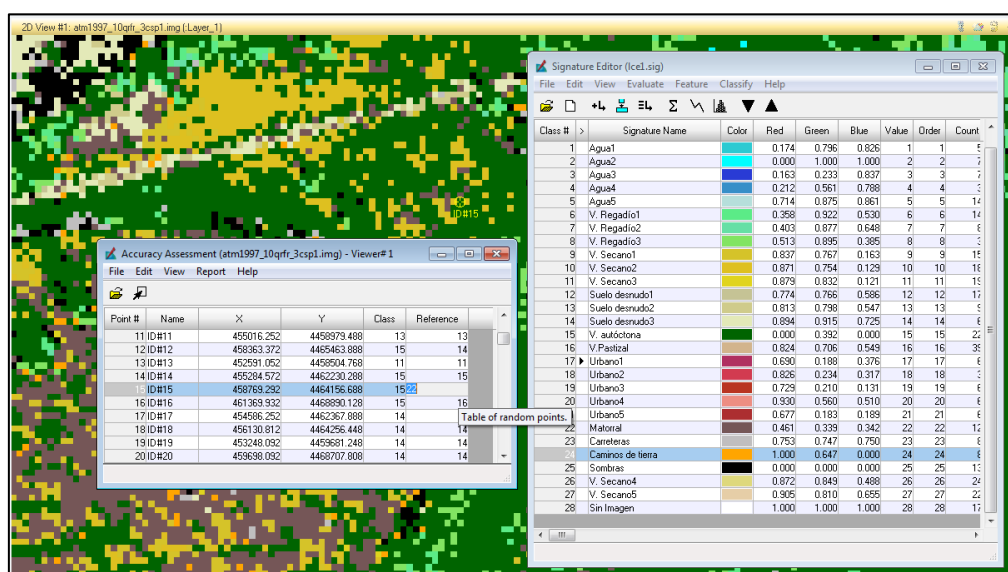


Figura 7.18 – Evaluación de la referencia de los puntos.

- Una vez se ha dado referencia a todos los puntos, se ha comprobado que se obtendrán los parámetros de error – para cada clase –, precisiones totales – para todas las clases, de forma general – y estadístico κ en el desplegable “Options” de la pestaña “Report”. El estadístico κ sirve para indicar el porcentaje de clasificaciones efectuadas que son mejores que las esperadas al azar, por tanto, da una idea de hasta qué punto el acierto de la clasificación se debe al simple azar. Luego se ha creado la matriz mediante el comando “Accuracy Report” de la misma pestaña. El resultado es un fichero con toda la información, que se ha guardado con formato “txt” bajo el nombre “mdc_csp1, para su posterior análisis.

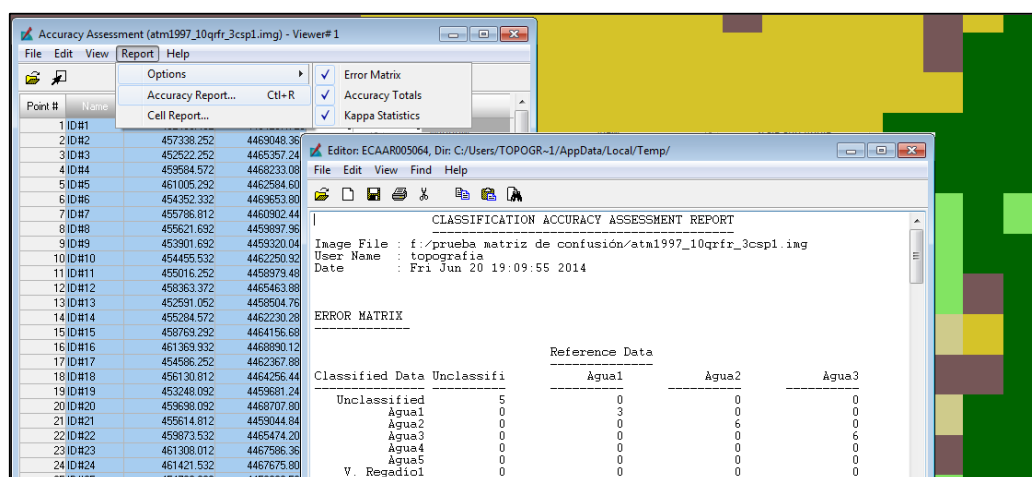


Figura 7.19 – Creación de la matriz de confusión.

A continuación, se muestran los resultados generales. Las columnas más importantes son “Producers Accuracy” o el porcentaje de superficie estimada de una clase que no ha sido correctamente clasificada, y “Users Accuracy” o el porcentaje de superficie estimada que ha sido correctamente clasificada. Al revisar la matriz de confusión, la información que se observa es que la clasificación por paralelepípedo para la repartición de los puntos de muestra según las clases resulta fiable, de forma generalizada, en un 71.43%. Sin embargo y de forma puntual, hay más porcentaje de clasificación erróneo que de no erróneo, las clases peor clasificadas son “V. Autóctona” y “Caminos de tierra” y hay clases que no han tenido puntos de referencia como las referentes a “Urbano” y “Secano”.

ACCURACY TOTALS						KAPPA (K*) STATISTICS	
Class Name	Reference Totals	Classified Totals	Number Correct	Producers Accuracy	Users Accuracy	Conditional Kappa for each Category.	
Unclassified	5	6	5	---	---	Unclassified	0.8260
Agua1	3	3	3	100.00%	100.00%	Agua1	1.0000
Agua2	6	6	6	100.00%	100.00%	Agua2	1.0000
Agua3	6	6	6	100.00%	100.00%	Agua3	1.0000
Agua4	5	6	5	100.00%	83.33%	Agua4	1.0000
Agua5	5	5	5	100.00%	100.00%	Agua5	0.8260
V. Regadio1	6	6	4	66.67%	66.67%	V. Regadio1	1.0000
V. Regadio2	8	6	4	50.00%	66.67%	V. Regadio2	0.6490
V. Regadio3	5	6	3	60.00%	50.00%	V. Regadio3	0.6426
V. Secano1	6	6	5	83.33%	83.33%	V. Secano1	0.4781
V. Secano2	5	6	3	60.00%	50.00%	V. Secano2	0.8245
V. Secano3	5	6	4	80.00%	66.67%	V. Secano3	0.4781
Suelo desnudo1	8	6	5	62.50%	83.33%	V. Secano4	0.6520
Suelo desnudo2	9	6	6	66.67%	100.00%	Suelo desnudo1	0.8213
Suelo desnudo3	7	6	5	71.43%	83.33%	Suelo desnudo2	1.0000
V. autóctona	3	6	1	33.33%	16.67%	Suelo desnudo3	0.8229
V. Pastizal	4	0	0	---	---	V. autóctona	0.1451
Urbano1	2	1	1	50.00%	100.00%	V. Pastizal	0.0000
Urbano2	1	2	1	100.00%	50.00%	Urbano1	1.0000
Urbano3	0	0	0	---	---	Urbano2	0.4958
Urbano4	0	0	0	---	---	Urbano3	0.0000
Urbano5	0	0	0	---	---	Urbano4	0.0000
Matorral	7	6	4	57.14%	66.67%	Urbano5	0.0000
Carreteras	5	6	5	100.00%	83.33%	Matorral	0.6458
Caminos de tier	2	6	1	50.00%	16.67%	Carreteras	0.8260
Sombras	6	6	3	50.00%	50.00%	Caminos de tier	0.1524
V. Secano4	0	0	0	---	---	Sombras	0.4735
V. Secano5	0	0	0	---	---	V. Secano4	0.0000
Sin Imagen	0	0	0	---	---	V. Secano5	0.0000
						Sin Imagen	0.0000
Totals	119	119	85				
Overall Classification Accuracy =				71.43%	Overall Kappa Statistics = 0.7003		

Figura 7.20 – Resultados de la matriz de confusión para regla de paralelepípedo.

Segundo Resultado

El segundo análisis se realiza con el archivo “atm1997_10qrfr_3csp2” de clasificación mediante regla mixta de paralelepípedo y máxima probabilidad. Para éste y los restantes archivos, se importan los puntos y sus referencias creados desde el formato “txt”, como se muestra en la figura 7.21.

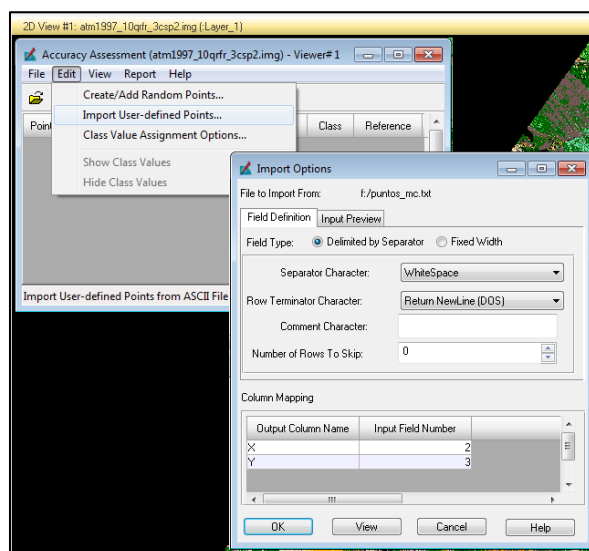


Figura 7.21 – Importación de puntos creados.

Como se observa a continuación, aunque el porcentaje de acierto general y los estadísticos κ son bajos, la matriz de confusión muestra mejores resultados por clase en este método que en el anterior, con porcentajes de aciertos mayores que de porcentajes de malas clasificaciones. La clase “Camino de tierra” sigue teniendo el valor más bajo, y también hay mala clasificación en “Regadío”, “Secano”, “Suelo desnudo” y “Matorral”.

ACCURACY TOTALS					KAPPA (K*) STATISTICS	
Class Name	Reference Totals	Classified Totals	Number Correct	Producers Accuracy	Users Accuracy	Conditional Kappa for each Category.
Unclassified	5	9	5	---	---	Class Name
Agua1	3	2	2	66.67%	100.00%	Unclassified
Agua2	6	5	5	83.33%	100.00%	Agua1
Agua3	6	0	0	---	---	Agua2
Agua4	5	4	4	80.00%	100.00%	Agua3
Agua5	5	5	5	100.00%	100.00%	Agua4
V. Regadio1	6	4	3	50.00%	75.00%	Agua5
V. Regadio2	8	1	1	12.50%	100.00%	V. Regadio1
V. Regadio3	5	0	0	---	---	V. Regadio2
V. Secano1	6	3	2	33.33%	66.67%	V. Regadio3
V. Secano2	5	4	3	60.00%	75.00%	V. Secano1
V. Secano3	5	5	4	80.00%	80.00%	V. Secano2
Suelo desnudo1	8	4	4	50.00%	100.00%	V. Secano3
Suelo desnudo2	9	2	2	22.22%	100.00%	Suelo desnudo1
Suelo desnudo3	7	5	4	57.14%	80.00%	Suelo desnudo2
V. autóctona	3	22	3	100.00%	13.64%	Suelo desnudo3
V. Pastizal	4	1	0	0.00%	0.00%	V. autóctona
Urbano1	2	0	0	---	---	V. Pastizal
Urbano2	1	2	1	100.00%	50.00%	Urbano1
Urbano3	0	0	0	---	---	Urbano2
Urbano4	0	0	0	---	---	Urbano3
Urbano5	0	0	0	---	---	Urbano4
Matorral	7	8	2	28.57%	25.00%	Urbano5
Carreteras	5	4	4	80.00%	100.00%	Matorral
Camino de tier	2	22	1	50.00%	4.55%	Carreteras
Sombras	6	6	2	33.33%	33.33%	Camino de tierra
V. Secano4	0	0	0	---	---	Sombras
V. Secano5	0	1	0	---	---	V. Secano4
Sin Imagen	0	0	0	---	---	V. Secano5
Totals	119	119	57			Sin Imagen
Overall Classification Accuracy = 47.90%					Overall Kappa Statistics = 0.4586	

Figura 7.22 – Resultados de la matriz de confusión para regla mixta.

Tercer Resultado

El tercer análisis se realiza con el archivo “atm1997_10qrfr_csmd3” de clasificación mediante regla de decisión de mínima distancia, que ofrece información de clases que los anteriores no ofrecen. El resultado, que se muestra a continuación, marca un porcentaje más bajo de clasificación que el método anterior. Clases como “Caminos de tierra”, “Regadío” y “Vegetación autóctona” aconsejan el replanteo de la leyenda, puesto que siguen siendo las peores clasificaciones, tras tres pruebas de error. Y clases como “Regadío” indican que es mejor plantearse el conjunto espectral de ND representativos que se desea que entre en los polígonos.

ACCURACY TOTALS					KAPPA (K ²) STATISTICS	
Class Name	Reference Totals	Classified Totals	Number Correct	Producers Accuracy	Users Accuracy	Conditional Kappa for each Category.
Unclassified	5	5	5	100.00%	75.00%	Unclassified 1.0000
Agua1	3	4	3	100.00%	83.33%	Agua1 0.7435
Agua2	6	6	6	100.00%	100.00%	Agua2 0.8245
Agua3	5	6	5	100.00%	83.33%	Agua3 1.0000
Agua4	5	7	5	100.00%	71.43%	Agua4 0.8260
Agua5	6	8	3	50.00%	37.50%	Agua5 0.7018
V. Regadio1	8	7	0	0.00%	0.00%	V. Regadio1 0.3418
V. Regadio2	5	1	0	0.00%	0.00%	V. Regadio2 -0.0721
V. Regadio3	6	12	4	66.67%	33.33%	V. Regadio3 -0.0439
V. Secano1	5	6	1	20.00%	16.67%	V. Secano1 0.2979
V. Secano2	5	11	4	80.00%	36.36%	V. Secano2 0.1301
V. Secano3	8	3	3	37.50%	100.00%	V. Secano3 0.3357
Suelo desnudo1	9	10	4	44.44%	40.00%	Suelo desnudo1 1.0000
Suelo desnudo2	7	4	2	28.57%	50.00%	Suelo desnudo2 0.3509
Suelo desnudo3	3	0	0	---	---	Suelo desnudo3 0.4688
V. autóctona	4	3	0	0.00%	0.00%	V. autóctona 0.0000
V. Pastizal	2	1	1	50.00%	100.00%	V. Pastizal -0.0348
Urbano1	1	3	1	100.00%	33.33%	Urbano1 1.0000
Urbano2	0	0	0	---	---	Urbano2 0.3277
Urbano3	0	0	0	---	---	Urbano3 0.0000
Urbano4	0	0	0	---	---	Urbano4 0.0000
Urbano5	7	5	2	28.57%	40.00%	Urbano5 0.0000
Matorral	5	4	4	80.00%	100.00%	Matorral 0.3625
Carreteras	2	3	0	0.00%	0.00%	Carreteras 1.0000
Caminos de tier	6	2	1	16.67%	50.00%	Caminos de tierra -0.0171
Sombras	0	2	0	---	---	Sombras 0.4735
V. Secano4	0	0	0	---	---	V. Secano4 0.0000
V. Secano5	0	0	0	---	---	V. Secano5 0.0000
Sin Imagen	0	0	0	---	---	Sin Imagen 0.0000
Totals	119	119	59			
Overall Classification Accuracy = 49.58%					Overall Kappa Statistics = 0.4707	

Figura 7.23 – Resultados de la matriz de confusión para regla de mínima distancia.

Cuarto Resultado

El cuarto análisis pertenece al archivo “atm1997_10qrfr_csmp3” de clasificación mediante regla de decisión de máxima probabilidad. Hay hasta 10 clases cuyo porcentaje de clasificación correctamente realizada es nulo o no tiene resultados esperados.

ACCURACY TOTALS					KAPPA (K ²) STATISTICS	
Class Name	Reference Totals	Classified Totals	Number Correct	Producers Accuracy	Users Accuracy	Conditional Kappa for each Category.
Unclassified	5	5	5	---	---	Unclassified 1.0000
Agua1	3	2	2	66.67%	100.00%	Agua1 1.0000
Agua2	6	6	6	100.00%	100.00%	Agua2 1.0000
Agua3	6	0	0	---	---	Agua3 0.0000
Agua4	5	3	3	60.00%	100.00%	Agua4 1.0000
Agua5	5	8	5	100.00%	62.50%	Agua5 0.6086
V. Regadio1	6	4	3	50.00%	75.00%	V. Regadio1 0.7367
V. Regadio2	8	1	1	12.50%	100.00%	V. Regadio2 1.0000
V. Regadio3	5	0	0	---	---	V. Regadio3 0.0000
V. Secano1	6	4	3	50.00%	75.00%	V. Secano1 0.7367
V. Secano2	5	5	3	60.00%	60.00%	V. Secano2 0.5825
V. Secano3	5	6	4	80.00%	66.67%	V. Secano3 0.6520
Suelo desnudo1	8	4	3	37.50%	75.00%	Suelo desnudo1 0.7320
Suelo desnudo2	9	4	3	33.33%	75.00%	Suelo desnudo2 0.7295
Suelo desnudo3	7	10	2	28.57%	20.00%	Suelo desnudo3 0.1500
V. autóctona	3	20	3	100.00%	15.00%	V. autóctona 0.1280
V. Pastizal	4	1	0	0.00%	0.00%	V. Pastizal -0.0348
Urbano1	2	1	1	50.00%	100.00%	Urbano1 1.0000
Urbano2	1	0	0	---	---	Urbano2 0.0000
Urbano3	0	1	0	---	---	Urbano3 0.0000
Urbano4	0	0	0	---	---	Urbano4 0.0000
Urbano5	0	0	0	---	---	Urbano5 0.0000
Matorral	7	9	1	14.29%	11.11%	Matorral 0.0556
Carreteras	5	7	5	100.00%	71.43%	Carreteras 0.7018
Caminos de tier	2	14	0	0.00%	0.00%	Caminos de tierra -0.0171
Sombras	6	2	1	16.67%	50.00%	Sombras 0.4735
V. Secano4	0	0	0	---	---	V. Secano4 0.0000
V. Secano5	0	2	0	---	---	V. Secano5 0.0000
Sin Imagen	0	0	0	---	---	Sin Imagen 0.0000
Totals	119	119	54			
Overall Classification Accuracy = 45.38%					Overall Kappa Statistics = 0.4307	

Figura 7.24 – Resultados de la matriz de confusión para regla de máxima probabilidad.

Modificación de la leyenda

Como se ha deducido, la enorme variedad espectral entre tipos de vegetación y tipos de tierra – mayormente estas dos clases – lleva a un replanteo de leyenda, de modo que la final quede más generalizada y mejor observada.

Se ha modificado la leyenda siguiendo los pasos ya descritos de los apartados desde el 6 hasta el reciente 7.2.3, obteniendo una nueva leyenda como se muestra a continuación:

- Clases informativas como “Caminos de tierra” entran en un tipo de clases espectrales como “Suelos desnudos”.
- Reducción de conjuntos de clases espectrales para las categorías “Agua”, “Secano”, “Regadío” y “Urbano”. Modificación de los conjuntos de píxeles representativos de estas categorías, en especial de “Regadío”.
- Distinción entre varios ND referentes a la categoría “Sombras”.

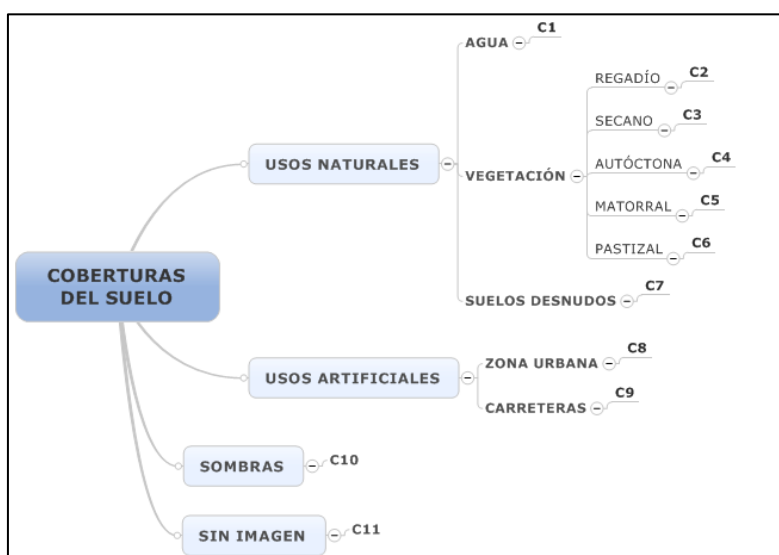
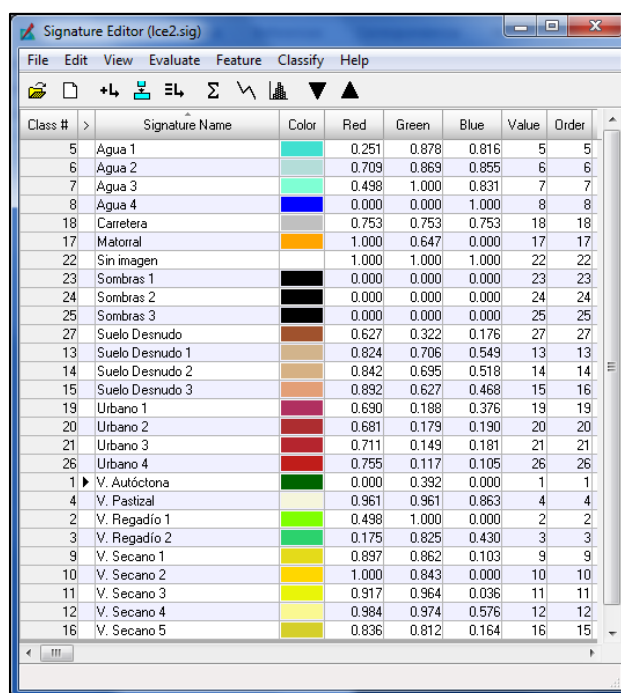


Figura 7.25 – Modificación categórica de la leyenda.

La leyenda se ha guardado bajo el nombre “Lce2” en la carpeta de entrada y se ha utilizado para las nuevas 4 clasificaciones hechas. Se han vuelto a modificar las clases referentes de acuerdo a la peor clasificación, paralelepípedo, considerando que hay una clase menos en total y que se han modificado los niveles digitales de las demás clases.

Los resultados se muestran en las figuras 7.27 y 7.28. La conclusión obtenida que se puede observar es que, definitivamente, clasificadores con reglas matemáticas de la naturaleza de paralelepípedo o de tipo mixta, no sirven para una clasificación general en una imagen de alta resolución como la presente ATM debido a la variabilidad de los niveles digitales, funcionarían mejor con leyendas más específicas y orientadas a imágenes de altas frecuencias espaciales. Se observa además que, en ese particular, la mejor opción es la clasificación por regla mixta.

Los archivos correspondientes a las clasificaciones resultantes descritas se han llamado, respectivamente, “atm1997_10qrfr_4csp1” y “atm1997_10qrfr_4csp2”.



Class #	Signature Name	Color	Red	Green	Blue	Value	Order
5	Agua 1		0.251	0.878	0.816	5	5
6	Agua 2		0.709	0.869	0.855	6	6
7	Agua 3		0.498	1.000	0.831	7	7
8	Agua 4		0.000	0.000	1.000	8	8
18	Carretera		0.753	0.753	0.753	18	18
17	Materral		1.000	0.647	0.000	17	17
22	Sin imagen		1.000	1.000	1.000	22	22
23	Sombras 1		0.000	0.000	0.000	23	23
24	Sombras 2		0.000	0.000	0.000	24	24
25	Sombras 3		0.000	0.000	0.000	25	25
27	Suelo Desnudo		0.627	0.322	0.176	27	27
13	Suelo Desnudo 1		0.824	0.706	0.549	13	13
14	Suelo Desnudo 2		0.842	0.695	0.518	14	14
15	Suelo Desnudo 3		0.892	0.627	0.468	15	16
19	Urbano 1		0.690	0.188	0.376	19	19
20	Urbano 2		0.681	0.179	0.190	20	20
21	Urbano 3		0.711	0.149	0.181	21	21
26	Urbano 4		0.755	0.117	0.105	26	26
1	V. Autóctona		0.000	0.392	0.000	1	1
4	V. Pastizal		0.961	0.961	0.863	4	4
2	V. Regadío 1		0.498	1.000	0.000	2	2
3	V. Regadío 2		0.175	0.825	0.430	3	3
9	V. Secano 1		0.897	0.862	0.103	9	9
10	V. Secano 2		1.000	0.843	0.000	10	10
11	V. Secano 3		0.917	0.964	0.036	11	11
12	V. Secano 4		0.984	0.974	0.576	12	12
16	V. Secano 5		0.836	0.812	0.164	16	15

Figura 7.26 – Leyenda Lce2.

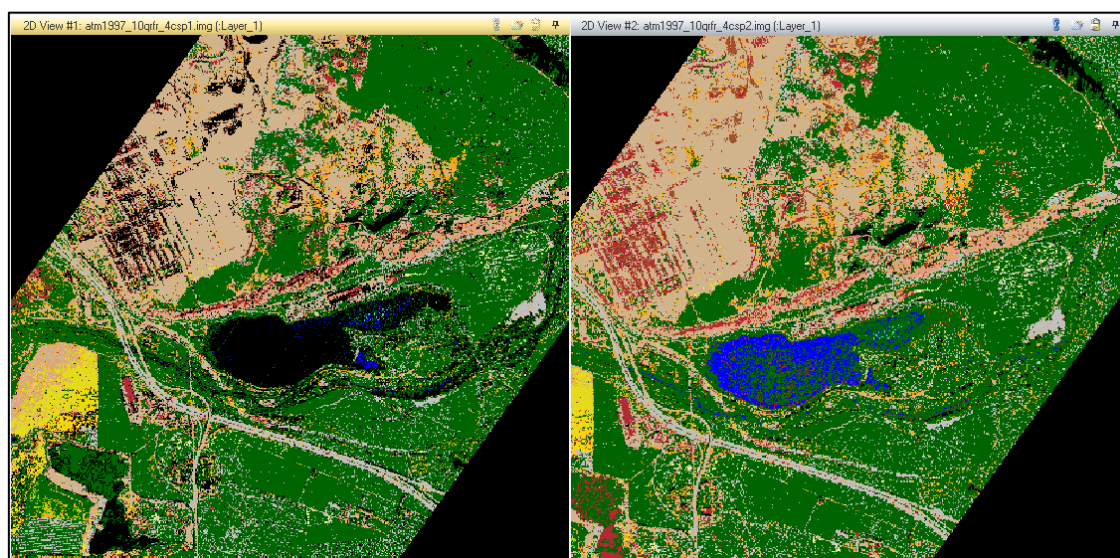


Figura 7.27 – Cuarto resultado de clasificación por paralelepípedo [izquierda].
Cuarto resultado de clasificación por paralelepípedo y máxima probabilidad [derecha].

Por el contrario, los algoritmos que mejor funcionan en este particular son los de mínima distancia o de máxima probabilidad, dado que respetan más los valores de cada clase. Los archivos correspondientes a estas clasificaciones resultantes se han llamado, respectivamente, “atm1997_10qrfr_csmd4” y “atm1997_10qrfr_csmp4”.

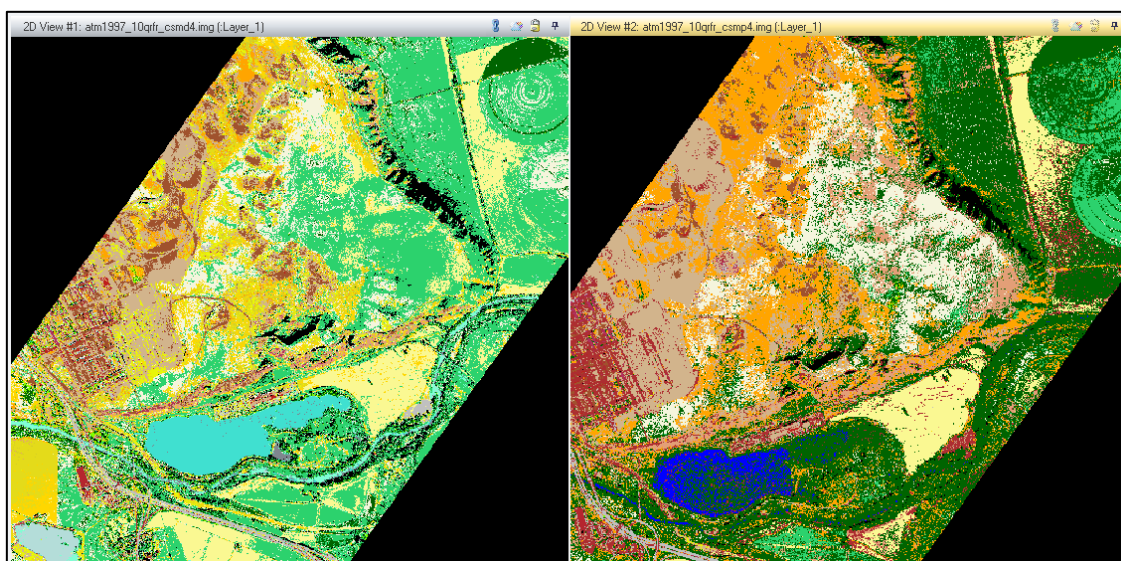


Figura 7.28 – Cuarto resultado de clasificación por mínima distancia [izquierda].
Cuarto resultado de clasificación por máxima probabilidad [derecha].

Como conclusión final, se ha tomado la decisión de adoptar una leyenda para la clasificación supervisada mediante la regla de decisión de mínima distancia. La justificación es debida en primer lugar a la matriz de confusión, ya que aunque hay ciertas clases cuyos puntos no cubren las muestras, se han vuelto a evaluar los resultados mediante esta herramienta, con los valores de las referencias modificados acorde a la nueva leyenda y se ha observado que esta regla genera los mejores porcentajes de acierto. Y, en segundo lugar, a que a raíz de la modificación de los conjuntos de niveles digitales representativos, se ha llegado a la mejor distinción de sombras no identificadas fácilmente de forma visual, como se puede observar en la figura 7.29

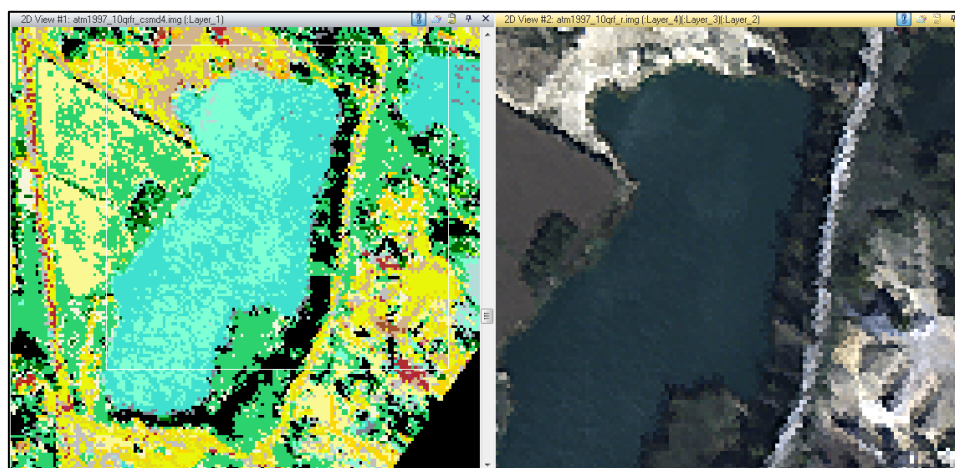


Figura 7.29 – Distinción de sombras en la imagen.

ACCURACY TOTALS						KAPPA (K ²) STATISTICS	
Class Name	Reference Totals	Classified Totals	Number Correct	Producers Accuracy	Users Accuracy	Conditional Kappa for each Category.	
Unclassified	5	5	5	---	---	Unclassified	1.0000
V. Autóctona	4	4	4	100.00%	100.00%	V. Autóctona	1.0000
V. Regadio 1	3	3	3	100.00%	100.00%	V. Regadio 1	1.0000
V. Regadio 2	12	14	11	91.67%	78.57%	V. Regadio 2	0.7617
V. Pastizal	5	5	5	100.00%	100.00%	V. Pastizal	1.0000
Agua 1	6	6	5	83.33%	83.33%	Agua 1	0.8245
Agua 2	15	14	13	86.67%	92.86%	Agua 2	0.9183
Agua 3	9	6	6	66.67%	100.00%	Agua 3	1.0000
Agua 4	4	4	4	100.00%	100.00%	Agua 4	1.0000
V. Secano 1	4	3	2	50.00%	66.67%	V. Secano 1	0.6551
V. Secano 2	8	9	7	87.50%	77.78%	V. Secano 2	0.7618
V. Secano 3	6	7	6	100.00%	85.71%	V. Secano 3	0.8496
V. Secano 4	13	17	11	84.62%	64.71%	V. Secano 4	0.6038
Suelo Desnudo 1	5	7	4	80.00%	57.14%	Suelo Desnudo 1	0.5526
Suelo Desnudo 2	4	1	1	25.00%	100.00%	Suelo Desnudo 2	1.0000
Suelo Desnudo 3	0	0	0	---	---	Suelo Desnudo 3	0.0000
V. Secano 5	4	4	3	75.00%	75.00%	V. Secano 5	0.7413
Matorral	1	1	1	100.00%	100.00%	Matorral	1.0000
Carretera	3	4	3	100.00%	75.00%	Carretera	0.7435
Urbano 1	0	0	0	---	---	Urbano 1	0.0000
Urbano 2	0	0	0	---	---	Urbano 2	0.0000
Urbano 3	0	0	0	---	---	Urbano 3	0.0000
Sin imagen	1	0	0	---	---	Sin imagen	0.0000
Sombras 1	2	1	1	50.00%	100.00%	Sombras 1	1.0000
Sombras 2	0	0	0	---	---	Sombras 2	0.0000
Sombras 3	2	1	1	50.00%	100.00%	Sombras 3	1.0000
Urbano 4	3	3	3	100.00%	100.00%	Urbano 4	1.0000
Suelo Desnudo	0	0	0	---	---	Suelo Desnudo	0.0000
Totals	119	119	99				
Overall Classification Accuracy =				83.19%	Overall Kappa Statistics =		
					0.8193		

Figura 7.30 – Distinción de sombras en la imagen.

Se propone entonces, dejar la leyenda original distinguiendo entre tipos de suelo – según los estados de humedad en la época del año que se registró la imagen – y los estados de vegetación, además de la leyenda genérica.

Una vez se ha escogido entre la mejor clasificación, se puede unificar los colores del mapa temático, modificándolos en la leyenda, que se ha guardado de nuevo como copia, con el nombre de “Lce3”. No se ha modificado el área de interés. Se muestra a continuación, el resultado, que se ha llamado “atm1997_10qrrf_csm5”.



Figura 7.31 – Edición de la leyenda y resultado final de la imagen.

7.3 CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA

Es el segundo tipo de clasificación de imágenes. En esta clasificación, el proceso de categorización de los píxeles se dirige a definir las clases espectrales presentes en la imagen. Es decir, no implica conocimiento alguno del área de estudio, por lo que la interpretación del analista se centra más en la interpretación de píxeles que en la consecución de resultados.

Esta estrategia asume que los ND de la imagen forman una serie de agrupaciones o conglomerados más o menos nítidos según los casos y, por tanto, que deberían definir clases temáticas de interés.

El método para definir agrupamientos espectrales se basa en la selección de 3 parámetros:

- Variables que intervienen en el análisis: que en imágenes de teledetección, son las bandas.
- Criterio para similitud o distancia entre los casos. La definición de distancia más empleada es la euclidiana.
- Criterio para agrupar los casos similares. Los criterios más empleados son *Media Difusa de K*, *Media de K* e *ISODATA*. De todos, se aplicará ISODATA en éste apartado.

DISCUSIÓN DEL PROCESO DIGITAL DE EJECUCIÓN

Para aplicar este algoritmo, se debe considerar que se aplicará un conjunto de clases y un conjunto de iteraciones. Los parámetros fundamentales que se utilicen en ésta y toda clasificación utilizada son:

- Número de clases o categorías que se desea identificar en la clasificación de la imagen.
- Máximo número de iteraciones que se desea realizar, para evitar que el proceso iterativo que supone la aplicación del algoritmo entre en un bucle sin final.
- Umbral mínimo a partir del cual se cambiará de categorías. Éste se aplica porque, si se cambia su suplementario porcentaje de píxeles de categoría en el algoritmo aplicado, el proceso de clasificación se da por finalizado.
- Valor del píxel que se quiere ignorar en la clasificación.

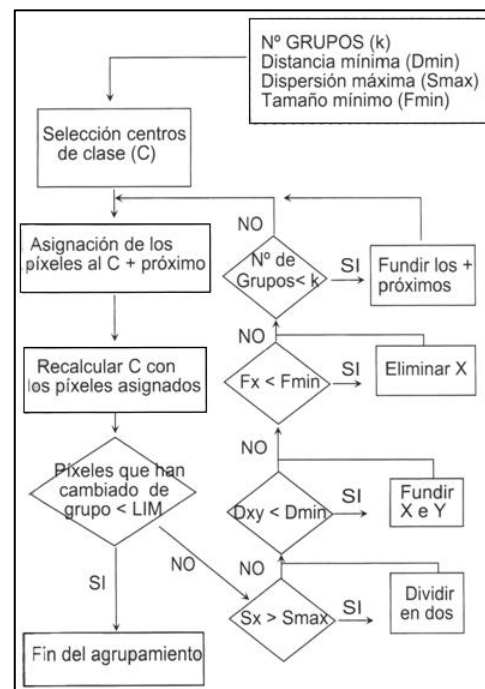


Figura 7.32 – Algoritmo ISODATA.

En base a los tres conjuntos de clasificaciones que se han realizado, se considerarán 3 series: de 12, de 18 y de 26 clases. En el primer caso se considerarán 25 iteraciones, en el segundo caso 30 y, en el tercer caso, 35 iteraciones. Todas las categorías tendrán umbral mínimo de 95% [0.95].

Se ha aplicado el proceso operativo para la primera serie, de 12 clases, como se muestra a continuación:

- Se abre la imagen “atm1997_10qrf_r” y se crea un área de interés nueva que cubra su perímetro. El área de interés se ha llamado “atm1997_10qrf_r_areacs”
- Se pulsa el comando “Unsupervised Classification” que se encuentra en el desplegable “Unsupervised” de la pestaña “Raster” de la barra de herramientas de ERDAS. El comando abre el cuadro de diálogo de clasificación no supervisada del mismo nombre.
- El nombre del fichero de salida es “atm1997_10qrf_r_cns12”, y el nombre de la leyenda resultante es el mismo. En “Initializing Options” se ha configurado la media normalizada – a partir del eje central y con desviación estándar 1 –. Se ha pedido una leyenda inicial en escala de grises mediante el botón “Color Scheme Options...” y se ha pedido que se ejecute sobre el área de interés dibujada.

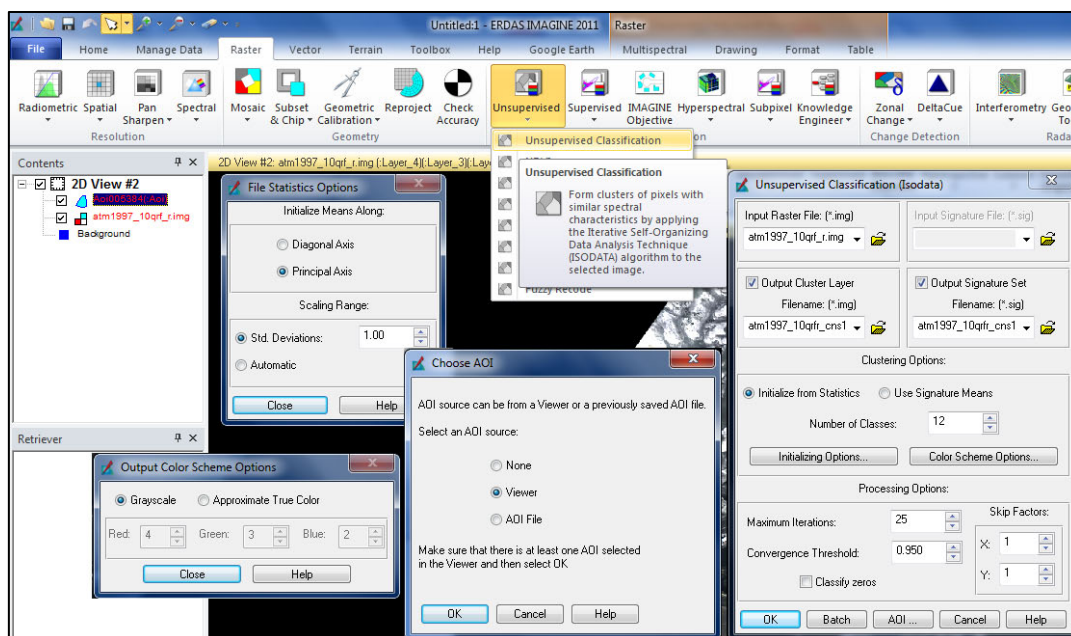


Figura 7.33 – Ejecución de ISODATA para 12 clases en ERDAS IMAGINE.

Al ejecutar el proceso, el cuadro de ejecución ha mostrado que la clasificación sólo ha necesitado 7 iteraciones.

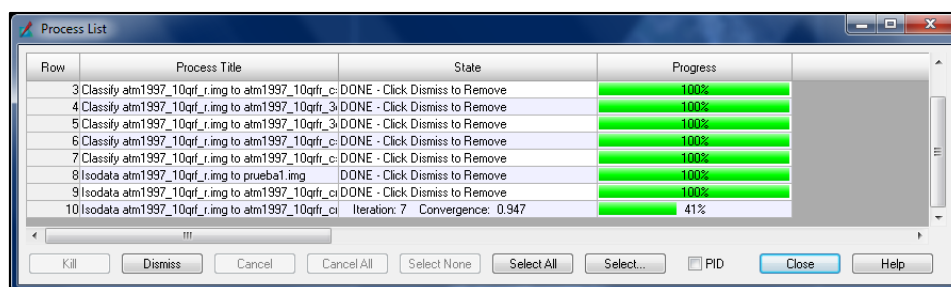


Figura 7.34 – Iteraciones y convergencia en ISODATA para 12 clases.

Para evaluar el resultado se ha modificado la leyenda de tonos grises que se generó con la imagen, en un principio, aleatoriamente. Una vez comprobado que ciertas identidades espectrales equivalían a ciertas identidades temáticas, se ha refinado el colorido inicial y se ha intentado llamar a cada clase por una categoría genérica. La leyenda queda como se muestra a continuación:

Row	Histogram	Color	Red	Green	Blue	Opacity	Class_Names
0	8228099		0.960784	0.960784	0.862745	0	Unclassified
1	416886		0	0	1	1	Class 1 - Agua
2	172876		0	1	0	1	Class 2 - Regadío
3	315632		1	0.647059	0	1	Class 3 - Secano
4	325951		0.960784	0.960784	0.862745	1	Class 4 - Pastizal
5	263335		0.102768	0.897232	0.263267	1	Class 5 - Regadío 2
6	387558		0.823529	0.705882	0.54902	1	Class 6 - Matorral
7	189475		0	0.392157	0	1	Class 7 - V. Autóctona
8	372472		0.627451	0.321569	0.176471	1	Class 8 - Suelo Desnudo
9	395050		1	0.843137	0	1	Class 9 - Secano 2
10	98319		0.14482	0.85518	0.359246	1	Class 10 - Regadío 3
11	311117		0.98575	0.87425	0.882821	1	Class 11 - S. Desnudo 2
12	140542		0.613162	0.246838	0.285733	1	Class 12 - Urbano

Figura 7.35 – Leyenda resultante para 12 clases.

La regla de decisión ISODATA, permite como vemos en la figura 7.36, resultados muy homogéneos. De este modo, se eliminan ciertas clases innecesarias que ya habíamos comprobado antes – en el anterior apartado – que no eran necesarias de especificar.

Por contrapartida, puede observarse que no ha distinguido entre ciertas clases informacionales, como las sombras y el agua, que reciben la misma categoría espectral de salida.

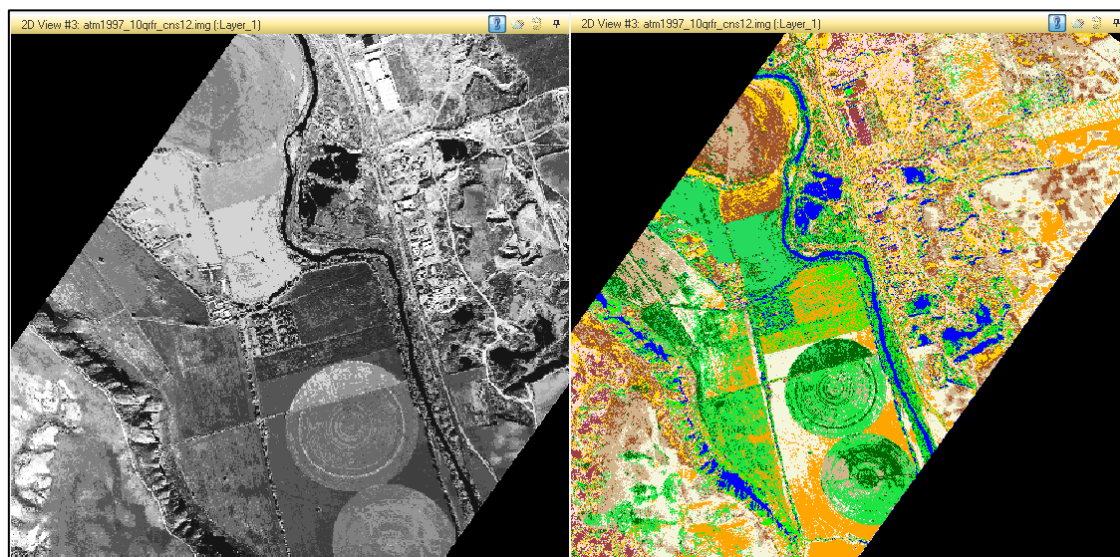


Figura 7.36 – Resultado ISODATA en niveles de gris [izquierda].
Modificación de la leyenda resultante a colores [derecha].

Se aplica, ahora, el segundo número de *clusters* que se busca clasificar, con 30 iteraciones para asegurar precisión sin bloquear el algoritmo. A continuación se muestran las únicas modificaciones realizadas en el cuadro de diálogo “Unsupervised Classification”.

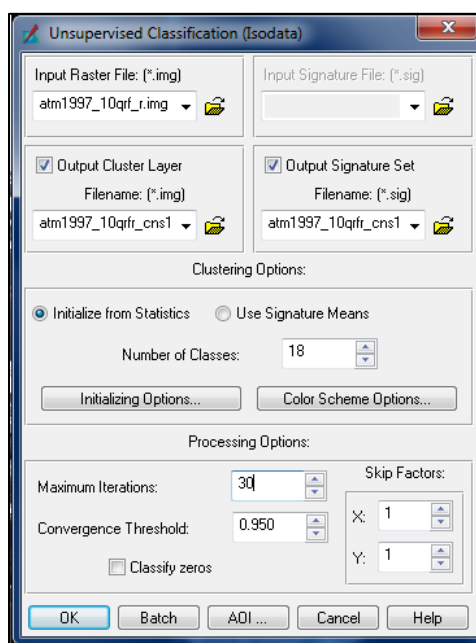


Figura 7.37 – Ejecución de ISODATA para 18 clases.

Han vuelto a ser necesarias 7 iteraciones para que el proceso se termine satisfactoriamente.

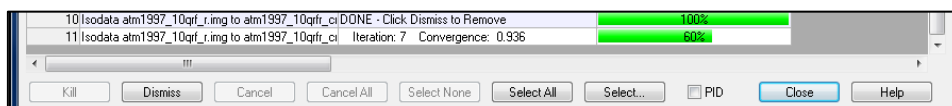


Figura 7.38 – Iteraciones y convergencia de ISODATA para 18 clases.

Se ha seguido el mismo proceso especificado, obteniendo una leyenda más rica en clases espectrales de suelo y de vegetación, eliminado categorías como “Carreteras”, que han entrado, por reflectancia y estadística, en un tipo de suelo desnudo, como el de clase 3. Sin embargo, no se consigue distinguir la clase informacional de sombras de la clase informacional de agua. La leyenda guardada se ha llamado como el archivo de salida adquirido, “atm1997_10qfr_cns18”.

atm1997_10qfr_cns18.img							
Row	Histogram	Color	Red	Green	Blue	Opacity	Class_Names
0	8228099		0	0	0	0	0 Unclassified
1	400657		0	0	1	1	1 Class 1 - Agua
2	118308		0.66	0.34	0.14	1	1 Class 2 - Regadío 1
3	104393		0.31	0.11	0.07	1	1 Class 3 - Regadío 2
4	241772		0.82	0.71	0.55	1	1 Class 4 - Pastizal 1
5	161224		0.87	0.78	0.13	1	1 Class 5 - Secano 1
6	243990		0.47	0.47	0.33	1	1 Class 6 - Pastizal 2
7	146384		0.69	0.74	0.62	1	1 Class 7 - Regadío 3
8	214257		0.4	0.6	0.45	1	1 Class 8 - Pastizal 3
9	263631		1	1	0.88	1	1 Class 9 - Matorral 1
10	114637		0.96	0.96	0.86	1	1 Class 10 - Matorral 2
11	174149		0.8	0.82	0.24	1	1 Class 11 - Suelo desnudo 1
12	214002		0.84	0.71	0.16	1	1 Class 12 - Suelo desnudo 2
13	178906		0.752941	0.752941	0.752941	1	1 Class 13 - Suelo desnudo 3
14	99693		0.05	0.33	0.23	1	1 Class 14 - V. Autóctona 1
15	51014		0	0.39	0	1	1 Class 15 - V. Autóctona 2
16	278380		0.87	0.66	0.56	1	1 Class 16 - Suelo desnudo 5
17	263243		0.96	0.77	0.04	1	1 Class 17 - Suelo desnudo 6
18	120573		0	1	0.96	1	1 Class 18 - Suelo desnudo 7

Figura 7.39 – Leyenda resultante para 18 clases.

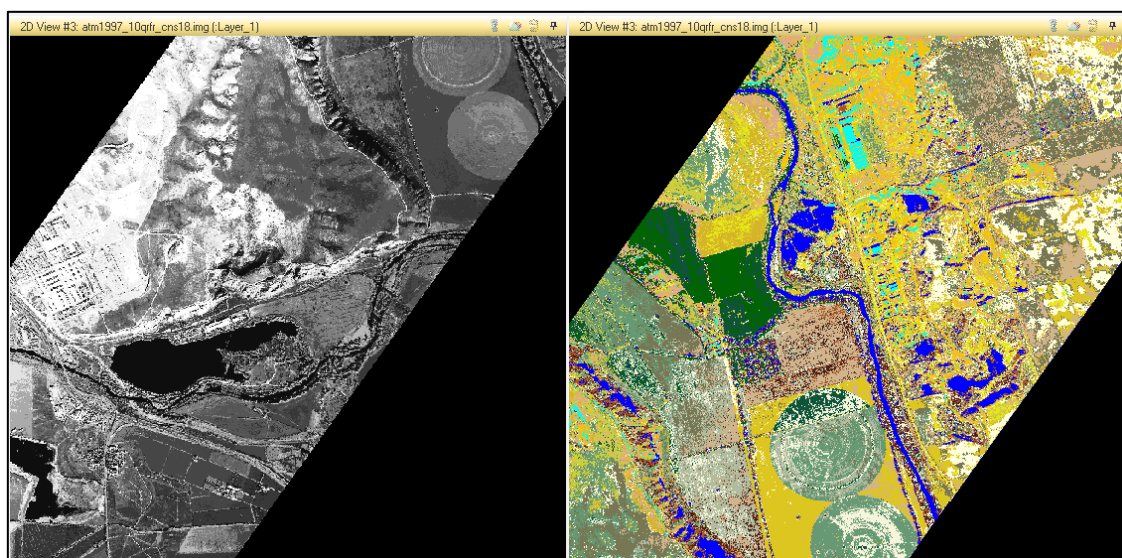


Figura 7.40 – Resultado ISODATA en niveles de gris [izquierda].
Modificación de la leyenda resultante a colores [derecha].

Finalmente, se aplica una clasificación no supervisada para el tercer número buscado de *clusters*, con 26 clases y asegurando precisión con un máximo número de 35 iteraciones. Las diferencias de configuración en el cuadro de diálogo “Unclassified”.

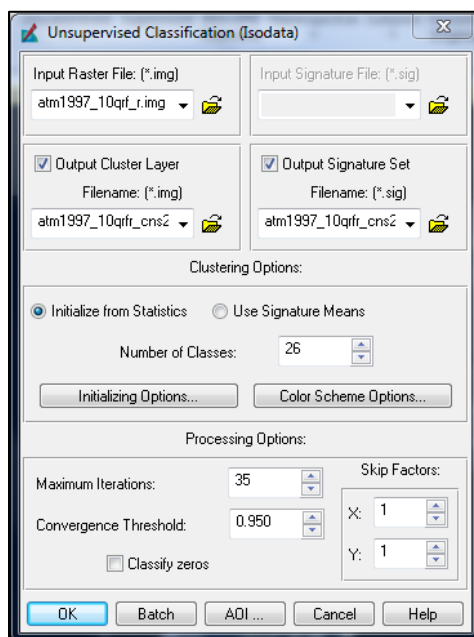


Figura 7.41 – Ejecución de ISODATA para 26 clases.

A diferencia de las dos aglomeraciones anteriores, ésta ha tenido una iteración más para que la convergencia se dé por cumplida:

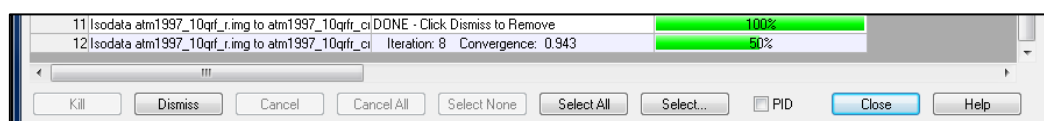


Figura 7.42 – Iteraciones y convergencia de ISODATA para 18 clases.

A continuación, se ha analizado la última leyenda y se ha modificado con colores similares según la repetición de la categoría informacional.

atm1997_10qrfr_cns26.img							
Row	Histogram	Color	Red	Green	Blue	Opacity	Class_Names
0	8228099		0	0	0	0	0 Unclassified
1	380849		0	0	1	1	1 Class 1 - Matorral/S. Desnudo 1
2	98051		0.82	0.71	0.55	1	1 Class 2 - Matorral/S. Desnudo 2
3	132471		0.52	0.51	0.28	1	1 Class 3 - Matorral 1
4	73449		0.88	0.83	0.12	1	1 Class 4 - Secano 1
5	72278		0.68	0.68	0.32	1	1 Class 5 - Secano 2
6	136575		1	1	0.88	1	1 Class 6 - Pastizal 1
7	129125		0.81	0.71	0.19	1	1 Class 7 - Secano 3
8	129732		0.25	0.75	0.28	1	1 Class 8 - Regadío 1
9	149603		0.93	0.97	0.85	1	1 Class 9 - Pastizal 2
10	149816		0.98	0.94	0.84	1	1 Class 10 - Pastizal 3
11	110896		0.98	0.99	0.83	1	1 Class 11 - Pastizal 4
12	149364		0.69	0.57	0.31	1	1 Class 12 - Secano 4
13	159548		0.57	0.73	0.33	1	1 Class 13 - Matorral 2
14	142827		0.58	0.5	0.42	1	1 Class 14 - Matorral 3
15	83404		0	0.39	0	1	1 Class 15 - V. Autóctona
16	122522		0	1	0	1	1 Class 16 - Regadío 2
17	99477		0.5	1	0	1	1 Class 17 - Regadío 3
18	189607		0.44	0.83	0.17	1	1 Class 18 - Regadío 4
19	84220		1	0.84	0	1	1 Class 19 - S. desnudo 1
20	79280		0.13	0.29	0.09	1	1 Class 20 - V. Autóctona 2
21	61117		0.13	0.25	0.2	1	1 Class 21 - V. Autóctona 3
22	108066		0.93	0.51	0.42	1	1 Class 22 - S. desnudo 2
23	87231		0.65	0.16	0.16	1	1 Class 23 - Secano 5
24	169892		1	0.75	0.8	1	1 Class 24 - S. desnudo 3
25	196166		0.91	0.57	0.15	1	1 Class 25 - S. desnudo 4
26	93647		1	0.65	0	1	1 Class 26 - S. desnudo 6

Figura 7.43 – Leyenda resultante para 26 clases.

Se ha encontrado que clasificaciones temáticas del tipo “Urbano” y “Carreteras” desaparecen definitivamente cuanto mayor número de *clusters* se apliquen en la realización de una clasificación espectral no supervisada. Éstas, por ejemplo, se han clasificado en la categoría de tipos de suelo.

Además, la distinción espectral agua/sombra sigue sin resolverse. No es una solución fácil de obviar en una clasificación no supervisada puesto que, los límites entre bordes de *clusters* de ambas categorías informacionales son muy difusos y el número de clases espectrales tendría que ampliarse excesivamente, perdiendo con ello, la finalidad temática de las demás categorías. Así, por ejemplo, se distinguiría entre agua y sombras a costa de que muy pocos píxeles representarían una determinada categoría espectral de suelo desnudo que, a efectos de área, sería una información que no se correspondería con la realidad.

Se puede concluir que las imágenes de la clasificación no supervisada, en una imagen de alta resolución espacial como la imagen ATM, deja la línea abierta para clasificación espectral de las distintas clasificaciones químicas de coberturas del suelo o ambientales de vegetación. De hecho, se puede jugar con la leyenda, aportando información en función de los conocimientos de reflectancia de materiales pétreos que se muestran en la imagen; o, aportando información respecto a la frondosidad o etapa de vegetación en una determinada época del año – la fecha de la imagen es de otoño –. Sin embargo, en cuanto se trata de una clasificación generalizada de las coberturas más importantes dentro de una imagen espectral, la mejor metodología viene de mano de la clasificación supervisada.

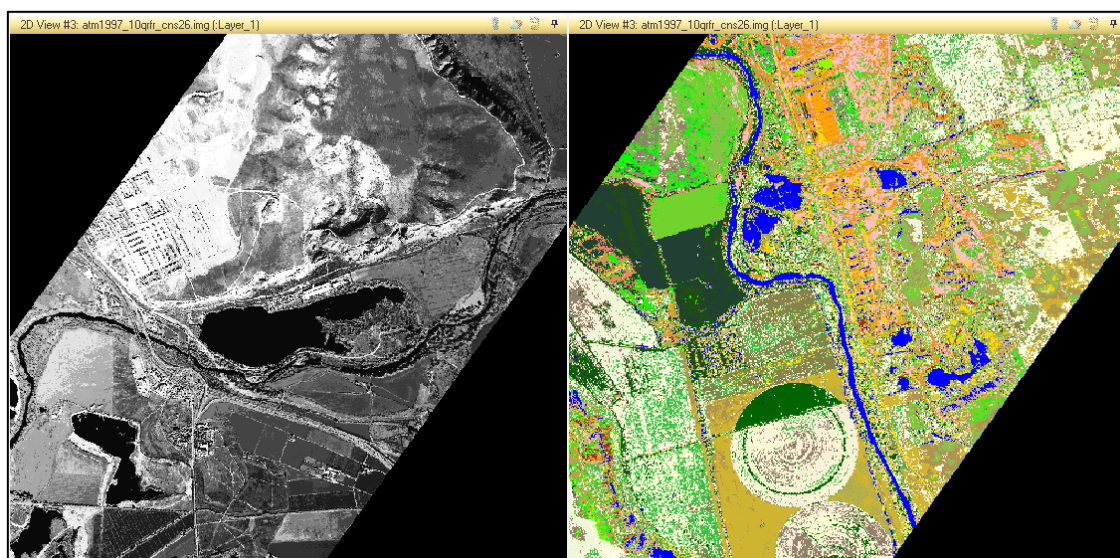


Figura 7.44 – Resultado ISODATA en niveles de gris [izquierda].
Modificación de la leyenda resultante a colores [derecha].



8. EDICIÓN CARTOGRÁFICA

8.1 EDICIÓN CARTOGRÁFICA TEMÁTICA

Una vez realizada la clasificación y definida la leyenda de coberturas de suelo, se puede proceder a realizar el diseño cartográfico para generar cartografía temática de coberturas superficiales. La versión de ERDAS sobre la que se ha estado trabajando dispone de herramientas capacitadas para llevar a cabo el proceso.

Se debe crear previamente una ventana de mapa sobre la cual trabajar, por lo que se abre mediante el comando “Map View” del desplegable “New” que se encuentra en la pestaña “File”, y se arrastra la imagen clasificada desde en el visor “2D View” al visor “Map View”.

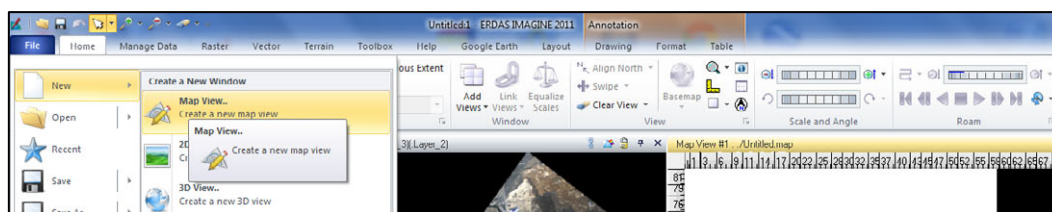


Figura 8.1 – Creación de la ventana de maquetación del trabajo.

El siguiente paso es la definición de las dimensiones del papel que hará de soporte cartográfico y las unidades de medidas.

Se ha establecido como objetivo presentar la cartografía a escala digital 1/20000. En formato papel, se entrega a escala equivalente basándose en la definición del marco.

Se ha escogido el formato DIN A1 de presentación, dada la adecuada dimensión de las medidas. Por tanto, se ha considerado las dimensiones de papel, de 594 x 841 mm y se ha prescindido del espacio de impresión necesario para la leyenda y los márgenes de la ortoimagen, dejando un espacio de impresión de 534 x 671 mm. Considerando que el marco que inscribe la imagen total tiene 4401 x 3499 píxeles, se ha establecido la equivalencia máxima en terreno – en metros – y se ha considerado que la escala de impresión es E: 1/25000.

Estos datos iniciales se considerarán a continuación para el procesado con el software indicado.

Con el visor “Map View” activado, se pulsa sobre el botón “Page Size” de la pestaña “Layout” y se introduce las dimensiones del papel y las unidades.

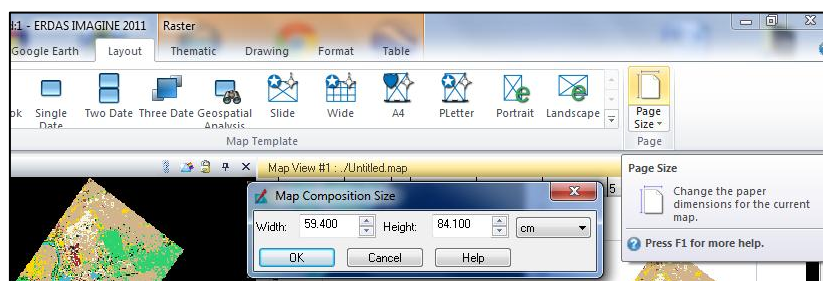


Figura 8.2 – Creación de la ventana de maquetación del trabajo.

El siguiente paso consiste en definir la escala de trabajo y el área de la imagen que aparecerá en la cartografía, teniendo en cuenta el límite de percepción visual – 0.2 mm –, la resolución

espacial del píxel – 3.44 m – y el tamaño de la imagen. Para introducir la escala, se pulsa doble click sobre la imagen en la ventana “Map View”. Así se han configurado escala y perímetro del marco, manteniendo el área del mapa.

Se ha configurado el color y el tipo y tamaño de texto de las coordenadas con el que se desea presentar la maya, mediante el cuadro de diálogo “Grid Preferences” que se abre desde el desplegable “Map Grid” que se encuentra en la pestaña “Layout”.

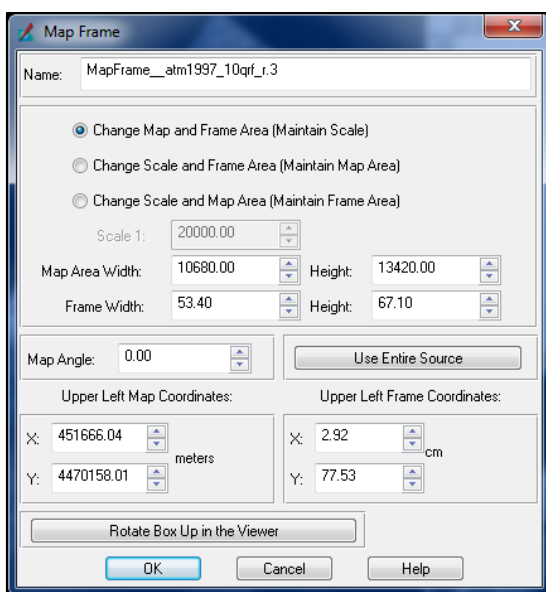


Figura 8.3 – Definición de la escala.

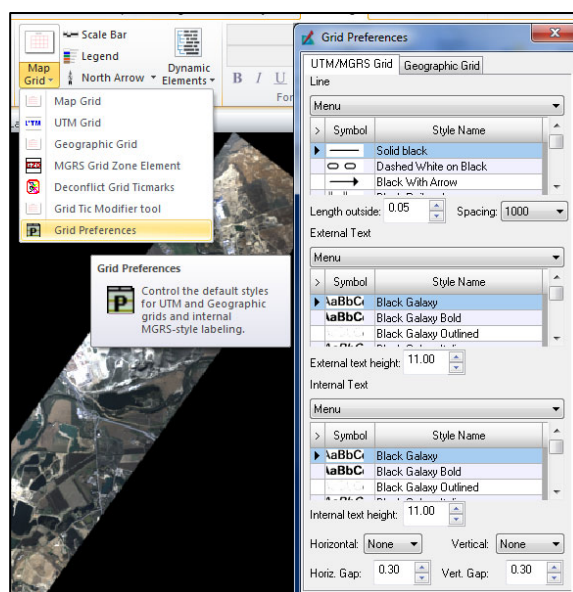


Figura 8.4 – Modificación de la rejilla.

Se ha definido el marco y se ha asociado una retícula a la imagen. Ésta, se ha realizado según las coordenadas de la proyección asociada al sistema de referencia UTM – huso 30, hemisferio norte –. Automáticamente se han definido el meridiano y paralelo origen de la retícula, así como el incremento entre meridianos y paralelos que componen la malla. Esto se ha realizado con el visor “Map View” activado, pulsando el desplegable “Map Grid” para abrir el cuadro de diálogo “Set Grid/Tick Info”, de definición de parámetros del marco y la retícula. Posteriormente, se ha dibujado la retícula y mediante el botón “UTM Grid” del desplegable.

Finalmente, una vez definidos los parámetros, se puede determinar la información adicional contenida en la cartografía. Esta información comprende datos relativos a:

- Leyenda
- Escala gráfica
- Dibujo del marco y posición por coordenadas.
- Simbología de representación de la dirección y del sentido del norte geográfico.
- Información sobre la base cartográfica empleada y los procesos realizados.
- Información sobre la autoría de la realización del producto.

Los elementos geométricos y de escritura se introducen mediante las herramientas de la pestaña “Drawing”. Los elementos gráficos, desde la pestaña “Layout”.

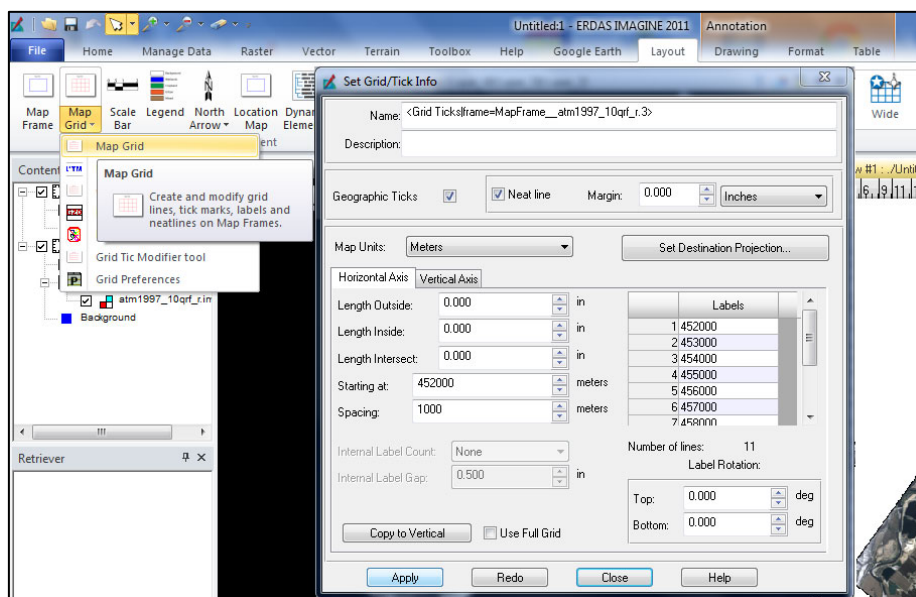


Figura 8.5 – Definición del marco y de la retícula.

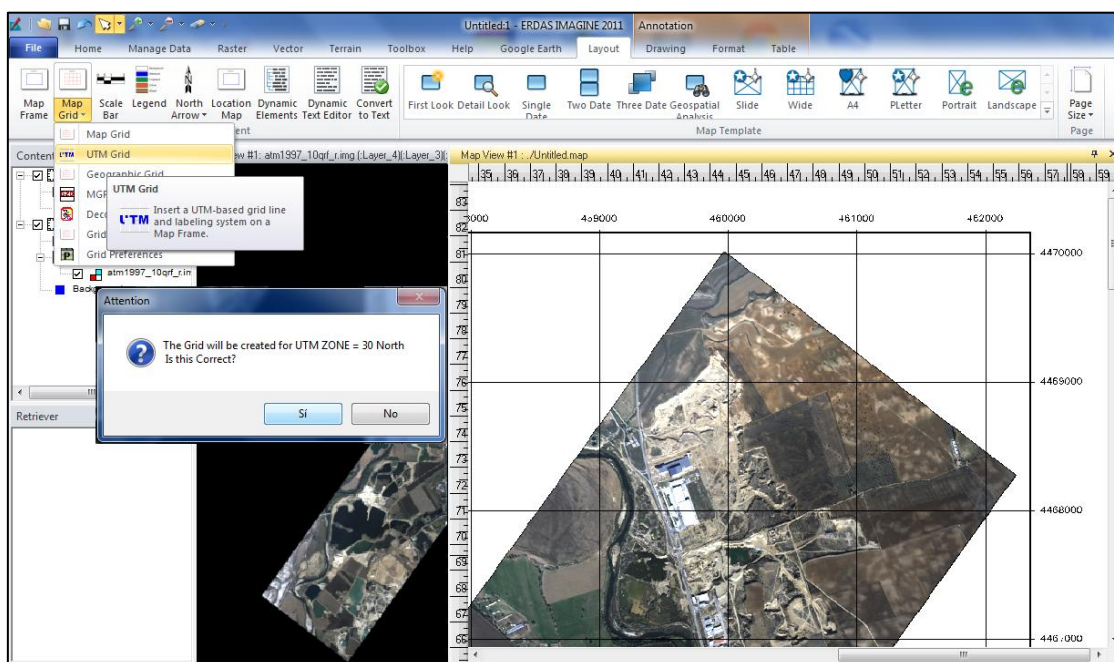


Figura 8.6 – Creación de la malla

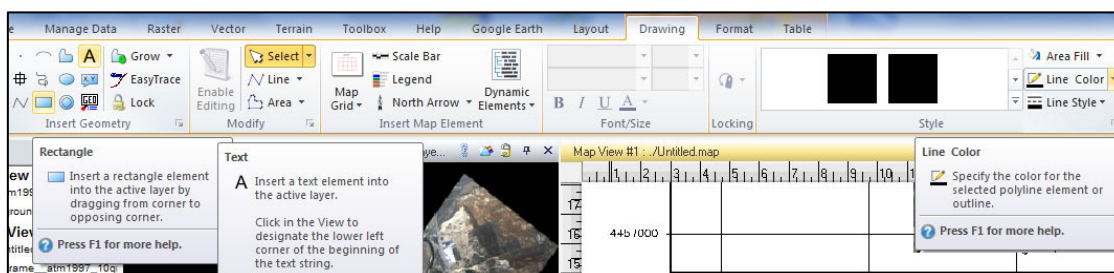


Figura 8.7 – Elementos geométricos y de descripción para la presentación.

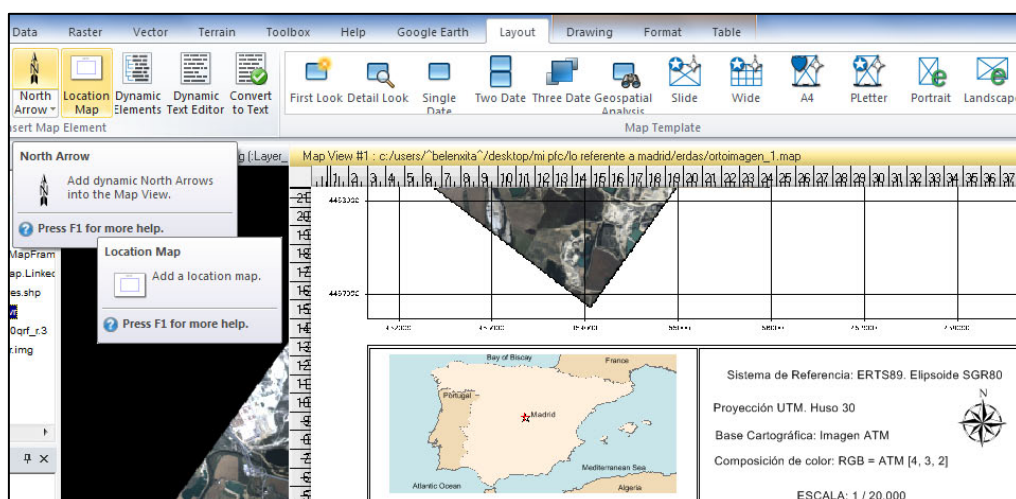


Figura 8.8 – Elementos gráficos para la presentación.

Para la definición gráfica de la escala se ha utilizado el comando “Scale Bar”, estableciendo la correspondencia “cm de escala por m de suelo”. Finalmente, se han insertado objetos de dibujo desde ventanas gráficas donde se han abierto en formato PGN.

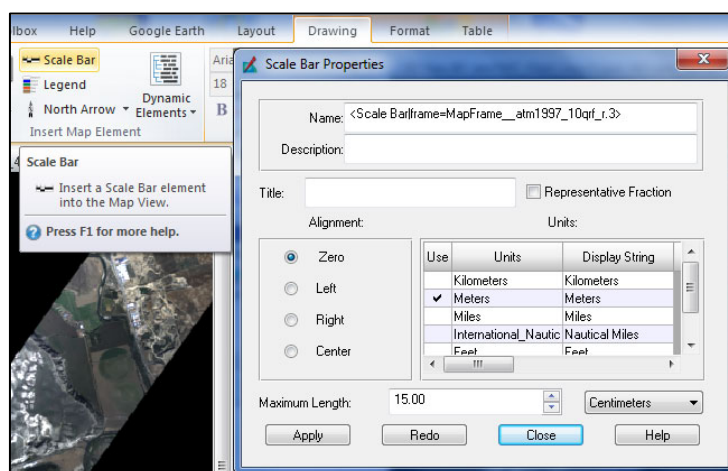


Figura 8.9 – Creación de la escala gráfica.

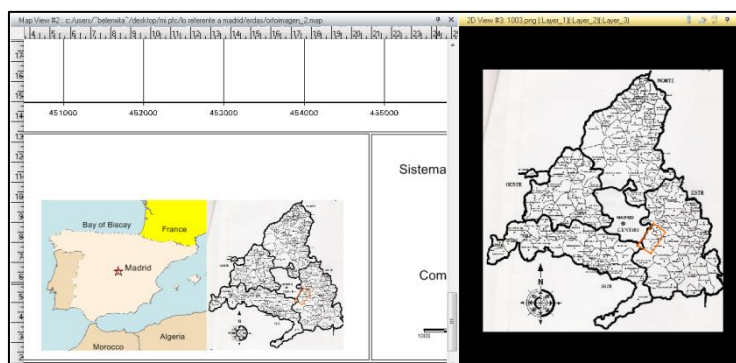


Figura 8.10 – Inserción de figuras de información.

8.2 RESULTADOS

Se ha realizado el proceso descrito en el apartado anterior para todos los documentos finales a presentar. Todas las cartografías tienen una resolución espacial de 3.44 m, en el Sistema de Referencia ETRS89 y en el sistema de proyección UTM para el huso 30 y el hemisferio Norte.

Cartografías presentadas:

- Ortoimagen con la tira de imagen ATM en formato digital, a escala digital E: 1/20000. El archivo se ha llamado “ortoimagen1”.
- Ortoimagen con la tira de imagen ATM en formato papel, a escala E: 1/25000. El archivo se ha llamado “ortoimagen2”.
- Cartografía temática de coberturas de suelos de la zona de Rivas Vaciamadrid, en formato digital a E: 1/20000. El archivo se ha llamado “mapatematico1”.
- Cartografía temática de coberturas de suelos de la zona de Rivas Vaciamadrid, en formato papel a E: 1/25000. El archivo se ha llamado “mapatematico2”.

En las siguientes páginas se muestra una vista general de dos de los mapas generados resultantes, que se entregan en formato digital escala E: 1/20000.

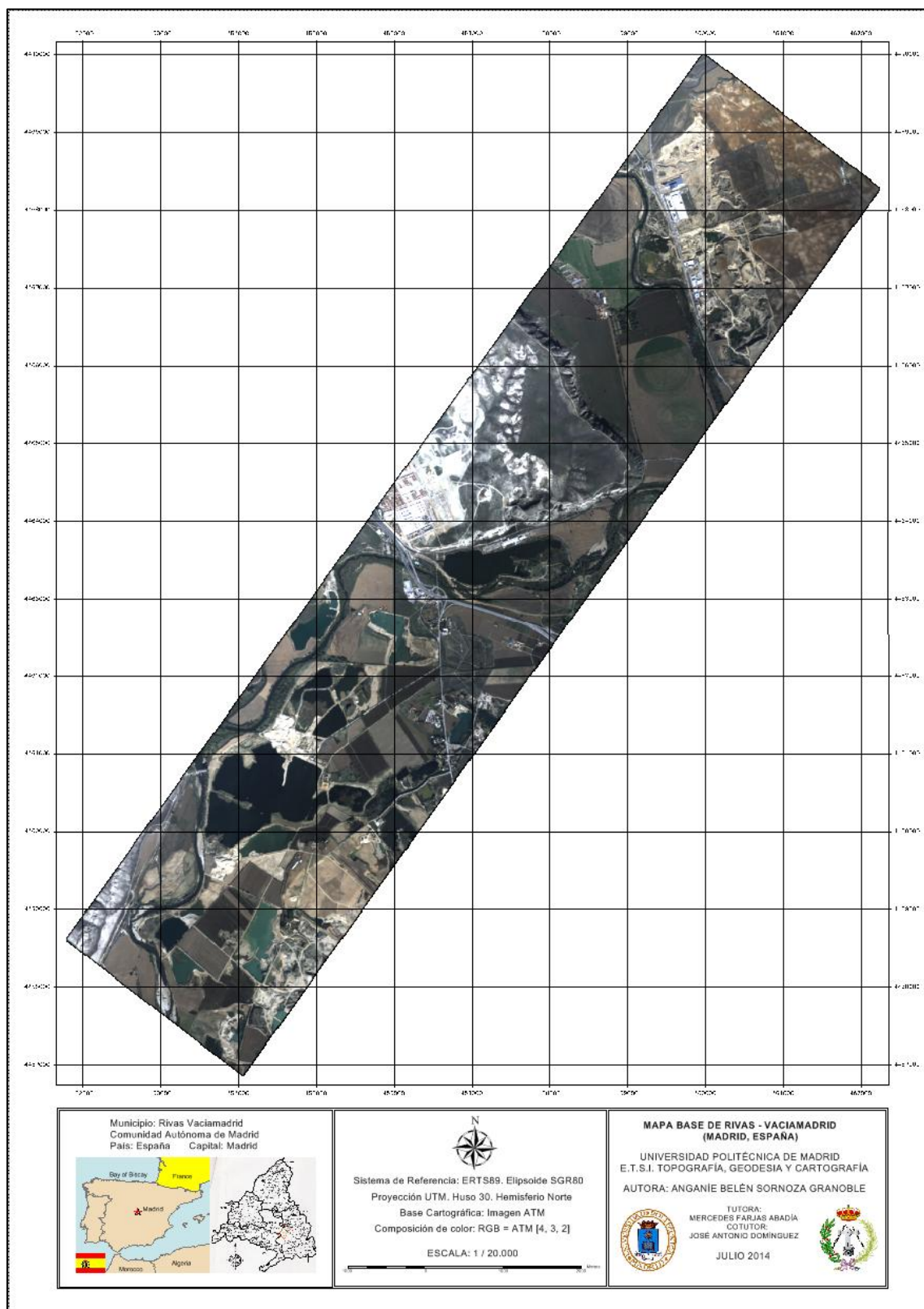


Figura 8.9 – Ortoimagen a escala E: 1/20000 de Rivas Vaciamadrid.

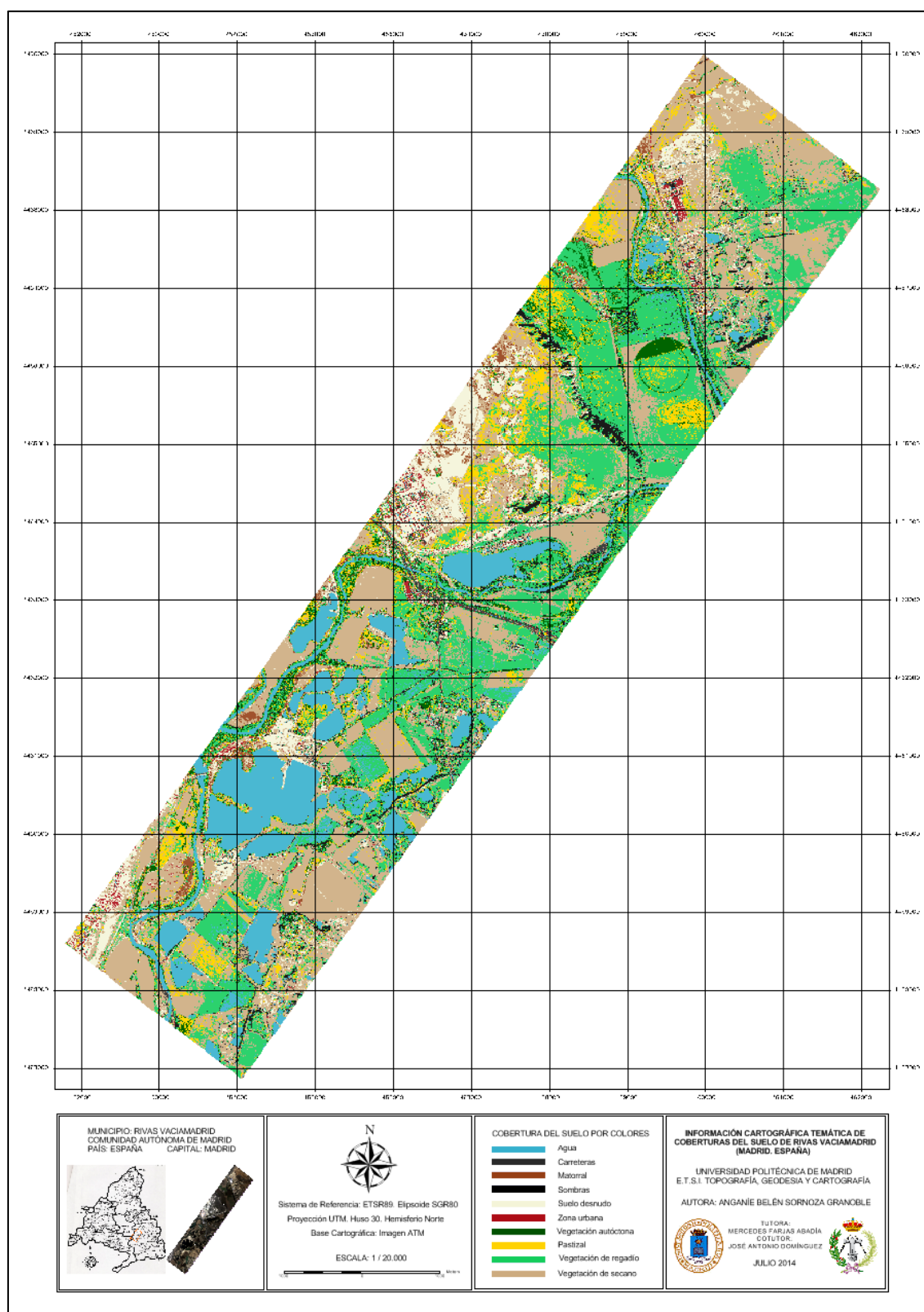


Figura 8.10 – Cartografía temática de los usos y coberturas del suelo de la zona de estudio, a escala E: 1/20000.



9. ANEXOS

9.1 ANEXO I

9.1.1 FUNDAMENTOS DE TELEDETECCIÓN

En un contexto básico, la teledetección o percepción remota abarca la información de los objetos sin estar en contacto físico con ellos. Como descripción detallada, es una disciplina científica que integra un amplio conjunto de conocimientos y tecnologías utilizadas para la observación, el análisis y la interpretación de fenómenos terrestres y planetarios. Supone la adquisición de información a distancia, sin contacto directo con el objeto estudiado. Sus principales fuentes de información son las medidas y las imágenes obtenidas con ayuda de plataformas aéreas y espaciales.

FUNDAMENTOS FÍSICOS DE TELEDETECCIÓN

Los fundamentos físicos de la teledetección espacial – dentro de la cual se incluye la teledetección aeroportada o aerotransportada – se comparten con otros sistemas de teledetección (fotografía aérea, televisión, visión ocular...), ya que todos se basan en la medida de la radiación electromagnética emitida o reflejada por los objetos, como respuesta a la incidencia de una radiación natural (luz solar) o artificial (radar). En el primer caso se habla de teledetección pasiva y en el segundo de teledetección activa.

Fundamentos básicos

El sistema de teledetección consta de diferentes elementos que se interrelacionan. En el caso de un sistema de teledetección de la superficie terrestre basado en ondas electromagnéticas, se caracteriza por los siguientes elementos:

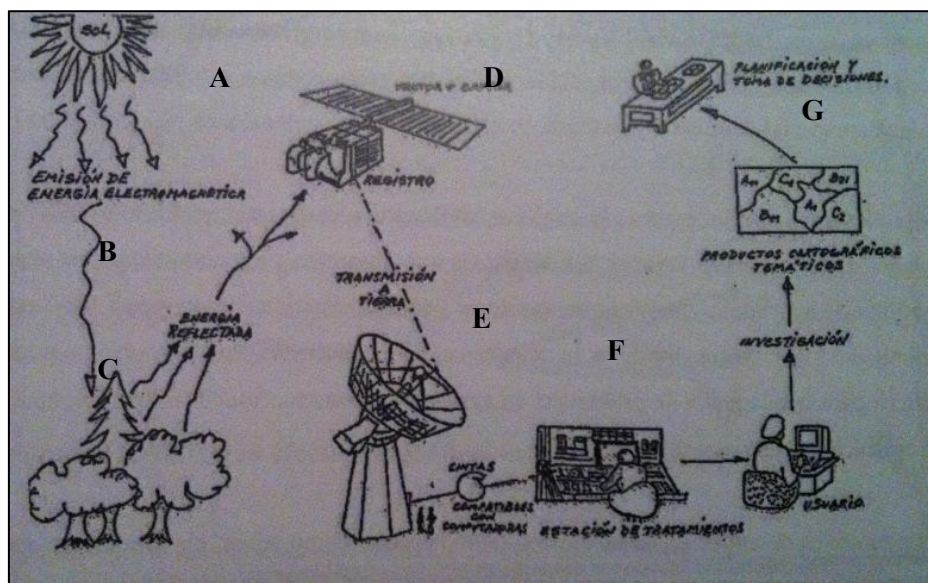


Figura 9.1 – Componentes de un sistema de teledetección.

- ❖ **La fuente de energía (A):** Es la que da origen al flujo energético que detecta por el sensor. Si el origen del flujo energético sale desde el propio sensor se trata de teledetección activa y si es una fuente externa a éste (por ejemplo, el Sol), se trata de teledetección pasiva.
- ❖ **La radiación y la atmósfera (B):** Cuando la energía recorre el camino desde la fuente hasta el objeto de la superficie terrestre, atraviesa e interactúa con la atmósfera. Este fenómeno también se produce en el camino desde el objeto hasta el sensor.
- ❖ **Interacción con el objeto de interés (C):** Cuando la energía llega a la tierra, interactúa con el objeto de interés conformando las diversas coberturas terrestres, tales como las vegetales, de los suelos, del agua, etc. Debido a ésta interacción energía-objeto y dependiendo de las características del objeto, la radiación será reflejada, absorbida (y posteriormente emitida) o transmitida a través del mismo.
- ❖ **Sistema del Sensor o Receptor de Radiación (D):** Es el que capta, codifica, graba la radiación que devuelve el objeto desde la tierra y envía la información posteriormente al sistema de recepción en tierra.
- ❖ **Sistemas de recepción (E):** Aquí, los datos recibidos en formato digital son pre-procesados para obtener una imagen en soporte o papel digital.
- ❖ **Interpretación y Análisis (F):** La imagen pre-procesada se interpreta de forma analógica o digital.
- ❖ **Aplicación (G):** El usuario final realiza las aplicaciones con la información extraída de la imagen, entendiendo el comportamiento de los objetos de interés registrados.

Radiación electromagnética. Espectro electromagnético.

En un sistema de teledetección terrestre, las ondas electromagnéticas son consideradas como las portadoras de la información, y por ello serán estudiadas en este apartado.

La radiación electromagnética se genera a partir de la transformación de otras formas de energía, como las energías cinética, química, térmica, eléctrica, magnética o nuclear. Las ondas electromagnéticas son las portadoras de la energía radiante. Al proceso físico que la genera se le llama radiación.

Esta radiación electromagnética es creada en todo punto del espacio por un doble campo periódico, el campo eléctrico y el campo magnético. Ambos campos son perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación.

Las propiedades magnéticas y eléctricas de la materia modifican las ondas que interactúan con ella. La teledetección es posible gracias a la interacción del flujo energético con las cubiertas terrestres, considerando tanto la dirección como la cantidad de flujo recibido por el sensor, permitiendo relacionar éste con el objeto de interés. Este flujo se ve afectado por diversos factores, entre otros:

- ❖ Influencia de la atmósfera: dispersión o difusión, absorción y refracción.
- ❖ Ángulo de iluminación solar: que depende de la fecha del año y de la hora de medición.
- ❖ Relieve: orientación, pendiente.
- ❖ Variaciones medioambientales de la superficie: asociación con otras cubiertas.

Dada la forma de propagación de una onda electromagnética, los diferentes tipos se definen por la longitud de onda o por la frecuencia. La longitud de onda expresa el carácter periódico de esta perturbación, y se define como la distancia entre dos picos contiguos de uno de los campos, midiéndose en unidades de longitud (m, mm...). La frecuencia es el registro del número de ciclos por unidad de tiempo que pasan por un punto fijo, midiéndose en hercios.

Las propiedades de la radiación electromagnética se han explicado por dos teorías aparentemente contrapuestas: la teoría ondulatoria y la teoría corpuscular:

❖ *Teoría Ondulatoria*

Propone que la naturaleza de la luz es ondulatoria y se transmite siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de $3 \cdot 10^8$ m/s. Está formada por dos campos de fuerzas normales entre sí: eléctrico y magnético. Las características de ésta onda pueden describirse con dos parámetros – longitud de onda $[\lambda]$ y frecuencia $[\nu]$ –.

❖ *Teoría Corpuscular*

Según ésta teoría, la luz es una sucesión de unidades discretas de energía – fotones – con masa $m = 0$. Son paquetes discretos o *quantums* de energía. Esta teoría cubre las diferencias de la formulación de Maxwell cuando trata de aplicar ciertos fenómenos significativos de interacción de la radiación electromagnética y la materia.

Actualmente se considera que la radiación electromagnética presenta una doble naturaleza ondulatoria y corpuscular, la primera se manifiesta en el fenómeno de la propagación y la segunda, en su interacción con la materia.

Tanto la longitud de onda como la frecuencia, permiten clasificar los diferentes tipos de energía electromagnética. Todos en conjunto reciben el nombre de espectro electromagnético y, cada una de las porciones del mismo, tienen denominaciones particulares – visible, ultravioleta, infrarrojo... –. Como la velocidad de propagación es la misma para todos los tipos de energía electromagnética, existe una relación inversamente proporcional entre longitud de onda y frecuencia y viceversa, utilizándose ambos valores de forma indiferente para la clasificación de ondas electromagnéticas.

El espectro electromagnético representa la continuidad de la energía electromagnética desde longitudes de onda muy cortas – rayos cósmicos y rayos gamma – a longitudes de onda muy largas – radio y televisión –, dividiéndose en bandas donde la radiación electromagnética presenta un comportamiento similar o son generadas por mecanismos similares. Estas divisiones no se definen de forma exacta y una región se confunde con la otra.

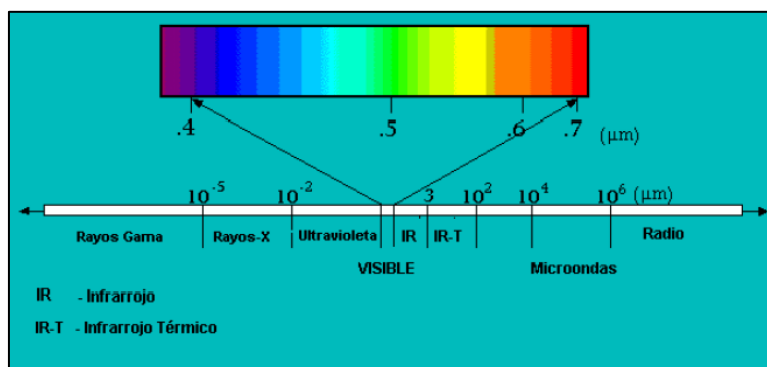


Figura 9.2 – El espectro electromagnético.

Los intervalos más usuales en teledetección son:

- ❖ Visible: Intervalo de longitud de onda de 0.4 a 0.7 μm .
- ❖ Infrarrojo Próximo: Intervalo de longitud de onda de 0.7 a 1.3 μm .
- ❖ Infrarrojo Medio: Intervalo de longitud de onda de 1.3 a 3 μm .

Se denomina región óptica del espectro [VNIR] al intervalo de entre 0.3 μm y 1.5 μm .

Las bandas de radio ocupan la región $\lambda > 10 \text{ cm}$, y se utilizan también por los sensores activos como radares, altímetros, sondas y, en menor medida, por radiómetros pasivos.

Las bandas de microondas ocupan el intervalo de λ [10 cm - 1 mm]. La mayor parte de las interacciones están regidas por rotaciones moleculares, particularmente las de λ más cortas. Es la región más utilizada por radiómetros/espectrómetros de microondas y sistemas radar.

Las bandas del infrarrojo cubren la región espectral desde longitudes de onda del orden de 1 mm hasta las de 0.7 μm . Esta región se divide en sub-regiones, llamadas sub-milimétricas: infrarrojo lejano [TIR], infrarrojo medio [SWIR] e infrarrojo próximo [NIR]. En esta región se produce gran parte de la radiación electromagnética debida a las rotaciones y vibraciones moleculares y es utilizada, para teledetección, por espectrómetros, radiómetros, polarímetros y láseres. La región del visible [0.4 μm – 0.7 μm], vecina al infrarrojo, juega un papel determinante en la energía de los niveles electrónicos.

En la región del ultravioleta [0.4 μm a 300 Angstroms], al igual que en el visible, la energía de los niveles electrónicos se encuentra en la explicación de las interacciones onda – materia. Los sensores de ultravioletas se han utilizado, principalmente, para el estudio de atmósferas planetarias o para estudiar superficies sin atmósfera, debido a la opacidad de los gases en éstas pequeñas longitudes de onda.

Los rayos X [300 – 0.3 Angstroms] y los rayos gamma [$\lambda < 0.3$ Angstroms] se han utilizado en menor medida para estudiar la opacidad atmosférica. Su uso se ha limitado a plataformas de vuelo a baja altura o al estudio de superficies sin atmósfera.

A continuación, se definirán los términos más relevantes empleados en teledetección, así como sus unidades de medida.

❖ **Energía radiante [Q]:**

Es el total de energía en todas las direcciones. Se mide en Julios [J].

❖ **Densidad de energía radiante [W]:**

Es la cantidad de energía por unidad de volumen. Se mide en Julios por metro cúbico [J/m³].

$$W = \frac{\partial Q}{\partial V}$$

❖ **Flujo radiante [Φ]:**

Es la cantidad de energía radiada por unidad de tiempo en todas las direcciones. Se mide en vatios [W], [J/s].

$$\Phi = \frac{\partial Q}{\partial t}$$

❖ **Densidad de flujo radiante [E, M]:**

Flujo radiante interceptado por la unidad de área de una superficie plana. Se mide en vatios por metro cuadrado [W/m²].

$$E, M = \frac{\partial \Phi}{\partial A}$$

Particularizando, se denomina:

- ❖ Irradianza [E]: Si el flujo es entrante hacia la superficie.
 - ❖ Exitancia o *Emitancia Radiante* [M]: Si el flujo es saliente de la superficie.
- ❖ **Intensidad radiante [I]:**
Es el flujo radiante desde una fuente puntual, saliendo de ésta en una dirección, por unidad de ángulo sólido. Se mide en vatios por estereorradián [W/Sr].

$$I = \frac{\partial \Phi}{\partial \Omega}$$

❖ **Radianza o Radiancia [L]:**

Es el total de energía radiada por una superficie en una determinada dirección por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Se mide en vatios por metro cuadrado y por estereorradián [W/m² · sr].

$$L = \frac{\partial I}{\partial A \cdot \cos \theta}$$

Por extensión de lo descrito, la radiancia espectral [L_T] indica el total de energía radiada en una determinada longitud de onda por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Se trata de la medida más cercana a la observación remota. Se mide en [W/m² · sr · μm].

$$L_T = \frac{\partial L}{\partial \lambda}$$

❖ **Albedo:**

Es otra variable que mide la radiación reflejada por los cuerpos. Es la relación entre la totalidad de la luz reflejada por la superficie y la totalidad de la luz incidente sobre la misma.

Se considera la luz incidente y la reflejada en todo el rango espectral y en todas las direcciones; lo contrario de la reflectancia, que suele referirse a una determinada longitud de onda y, en el caso de un satélite, en una dirección.

Cuando un flujo de energía radiante [Φ] alcanza la superficie de un determinado material, una parte de esa radiación es reflejada, otra es absorbida y otra es transmitida, generando los diferentes flujos, respectivamente Φ_r , Φ_a , Φ_t . Así tenemos, respectivamente, la ecuación del balance energético y la proporcionalidad relativa de las interacciones energéticas:

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t$$

$$1 = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} + \frac{\Phi_a}{\Phi_i} + \frac{\Phi_t}{\Phi_i} = \rho + \alpha + \tau$$

La relación entre las tres magnitudes no es constante, sino que varía con cada longitud de onda, por lo que obtendríamos la igualdad:

$$1 = \rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda$$

Para la cual los componentes se denominan: reflectancia, absortancia y transmitancia.

❖ **Reflectancia o Reflectividad [ρ]:**

Relación entre el flujo reflejado por una superficie y el incidente en ella.

La reflectancia varía según la dirección considerada y por tanto pueden hacerse diferentes medidas sobre la misma:

- ❖ *Reflectancia hemisférica*: Se considera la incidencia proveniente de la semiesfera sobre el centro, o del centro hacia la semiesfera. Se usa en laboratorio.
- ❖ *Reflectancia direccional*: Se considera la incidencia según una dirección única, formando el mismo ángulo de entrada y salida respecto a la normal a la superficie. Es la usada en Teledetección por satélite.

❖ **Absortancia o Absortividad [α]:**

Relación entre el flujo absorbido por una superficie y el incidente en ella.

❖ **Transmitancia o Transmisividad [τ]:**

Relación entre el flujo transmitido a través de una superficie y el incidente en ella.

❖ **Emisividad [ϵ]:**

Relación entre la Emitancia de una superficie [M] y la que daría un emisor perfecto – cuerpo negro – a la misma temperatura [M_n].

❖ **Interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera.**

Cuando la radiación electromagnética que sale del sol viaja hacia la superficie terrestre atraviesa la atmósfera, produciéndose una interacción entre la radiación y los diversos constituyentes atmosféricos provocando diferentes procesos, principalmente absorción y dispersión. Este fenómeno también se da en el camino desde la superficie de reflexión hacia el sensor.

Constituyentes atmosféricos:

La atmósfera está compuesta fundamentalmente por gases, aerosoles y nubes. Tanto los gases como los aerosoles contribuyen a la dispersión y absorción de la radiación, provocando en el primer caso un cambio de dirección sin cambio de propiedades – disminuye el contraste y, por lo tanto, degrada los contornos de la imagen – y en el segundo caso, una disminución de la cantidad de energía en una determinada longitud de onda. Afectan principalmente al intervalo del visible e infrarrojo, siendo casi despreciables en la región microondas.

Los principales gases atmosféricos son el nitrógeno (78%) y el oxígeno (21%), existiendo también en pequeñas cantidades vapor de agua – H_2O –, dióxido de carbono – CO_2 – y ozono – O_3 –. Todos los gases contribuyen a la dispersión y su efecto combinado se calcula a partir de funciones modelo por densidad de la atmósfera y presión.

Las nubes grandes en relación al tamaño del píxel influyen en la observación remota de la Tierra, produciendo alta reflectancia en el intervalo del visible y del IR próximo, además de una disminución de la temperatura estimada en el IR térmico.

Dispersión atmosférica.

También llamada *scattering*. Afecta a la dirección de la radiación visible y puede modificar también la distribución espectral de las longitudes de onda del visible y cercanas a él. Se distinguen 3 tipos.

- ❖ **Dispersión de Rayleigh:** se produce cuando la longitud de onda de la radiación es mayor que el tamaño de las partículas. Es inversamente proporcional a 4 veces la longitud de onda (el azul es dispersado 4 veces más que el rojo y el UV, cerca de 16 veces más).
- ❖ **Dispersión de Mie:** Se produce cuando la longitud de onda de la radiación es aproximadamente igual al tamaño de las partículas. Su efecto en Teledetección es un deterioro general de las imágenes multispectrales en el espectro óptico debido a polvo, polen, contaminación o gotas de agua.
- ❖ **Dispersión no selectiva:** Se produce cuando el tamaño de las partículas es mucho mayor que la longitud de onda en la atmósfera inferior. Se llama así, porque no depende de la longitud de onda.

Absorción atmosférica.

La absorción se produce cuando un átomo o molécula recibe radiación electromagnética y se excita a un nivel de energía superior, afectando a longitudes de onda mayores o menores que las de la luz visible, al contrario que la dispersión.

Los absorbentes atmosféricos más importantes son el vapor de agua, el dióxido de carbono y el ozono. El fenómeno de la absorción es muy selectivo, se limita a determinadas longitudes de onda dentro del espectro electromagnético – las inferiores a 0.3 μm por el ozono, por ejemplo –. Las regiones del espectro donde estos procesos son débiles y, por tanto, la transmisión de energía se produce con facilidad, reciben el nombre de “ventanas espectrales” y se centran especialmente en el ultravioleta, el visible y el infrarrojo reflejado y térmico, además de las longitudes de onda superiores a 1mm, donde la transmisión atmosférica es total, siendo ésta una de las principales razones de su frecuente uso en teledetección – radar –. Los principales sensores utilizados en los sistemas de teledetección espacial se centran, por razones obvias, en las regiones de las ventanas espectrales y en las longitudes de onda donde la emisión es mayor

Ventana	Banda espectral (μm)
1	0.3 – 1.3
2	1.5 – 1.8
3	2.0 – 2.6
4	3.0 – 3.6
5	4.2 – 5.0
6	7.0 – 15.0

Figura 9.3 – Ventanas atmosféricas.

Interacciones entre la energía electromagnética y la superficie terrestre.

La energía electromagnética que recibe la superficie terrestre sufre diferentes procesos. Una parte puede ser reflejada y el resto penetra en los elementos de la superficie terrestre a través de ondas refractadas que pueden ser absorbidas o transmitidas, dependiendo de la naturaleza de los objetos y de la longitud de onda de la energía.

Por otra parte, la energía absorbida es posteriormente devuelta en forma de energía emitida por los objetos, aunque dicha emisión se produce en otras longitudes de onda – generalmente, más largas – dependiendo de su temperatura. Aplicando el principio de conservación de la energía, podemos decir que:

$$E \text{ incidente} = E \text{ reflejada} + E \text{ absorbida} + E \text{ transmitida}$$

Como todos – o la mayor parte – de los sistemas de teledetección se sustentan en la energía reflejada o emitida por los objetos, es interesante definir el concepto de *reflectividad* o *reflectancia* que equivaldría al porcentaje de energía reflejada respecto a la energía incidente.

Sin embargo, la reflexión de los objetos depende, en gran medida, de su naturaleza interna y del grado de rugosidad de la superficie, pudiéndose diferenciar dos tipos de reflexión extremos:

- ❖ **Reflexión especular:** Se produce en superficies lisas y planas, donde las variaciones altimétricas de la rugosidad superficial sean menores que la longitud de onda. En estos casos, el ángulo de reflexión es igual al de incidencia, pudiendo llegar a saturar el detector – reflejos en el agua para el espectro visible, por ejemplo –.
- ❖ **Reflexión difusa o lambertiana:** Cuando las variaciones de la rugosidad superficial son mayores que la longitud de onda, la energía es reflejada más o menos uniformemente en todas las direcciones con independencia del ángulo de incidencia – arena, nieve... –, dependiendo la reflectancia sólo de la longitud de onda.

Los cuerpos reales se encuentran entre éstos dos tipos de reflexión, produciéndose además una dispersión hacia el interior por los huecos del material que finalmente emerge tras reflexiones múltiples.

Si el material tiene un rango de longitudes de onda de máxima absorción, la radiación reflejada presenta mínimos en ese rango espectral, y estas bandas son denominadas bandas de absorción, fundamentales para caracterizar el objeto, puesto que dependen del tipo de material.

Firmas espectrales.

Cualquier material sobre el que incida radiación electromagnética reflejará una parte de ese flujo. Dependiendo de la longitud de onda, permitirá en Teledetección discriminar diferentes objetos. Por ello, es necesario basarnos en perfiles espectrales que disminuyan el error de identificación. Las respuestas, tanto en reflectancia como en emitancia, constituyen la llamada “signatura o firma espectral” de cada material.

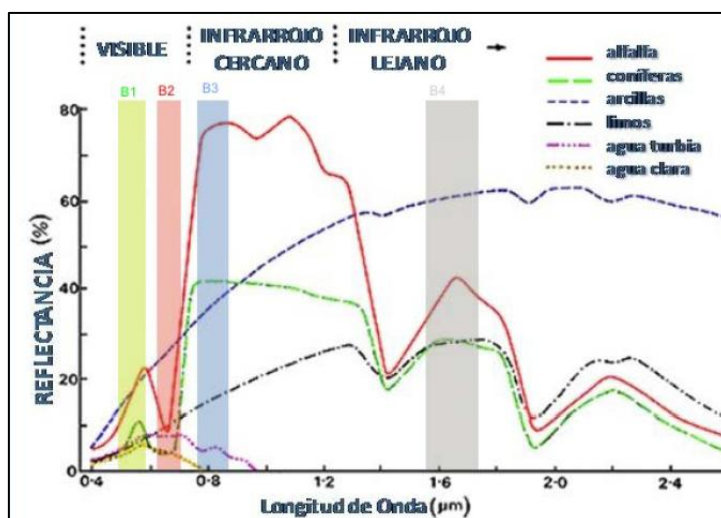


Figura N.4 – Firmas espectrales.

Las firmas espectrales se consideran funciones en las que a la variable longitud de onda de un material le corresponde un único valor de reflectancia. Este valor se expresa en “tantos por cien” o en “*tantos por cien por ciento*” (en lenguaje de programación, donde se trabaja con números enteros y positivos).

Estas firmas espectrales de los materiales varían en el espacio y en el tiempo, de manera que un mismo objeto puede tener aspectos diferentes según el lugar, condiciones climáticas, latitud y otras condiciones ambientales. Hay que considerar también el tamaño, forma, configuración, textura, etc. En Teledetección, esto es posible gracias a la multispectralidad de las imágenes que permiten obtener valores de reflectancia en distintas longitudes de onda.

Dado el gran número de factores que intervienen, es importante comparar los resultados obtenidos por observación en el terreno.

Características espectrales de los suelos.

La extensa presencia del suelo sobre la superficie terrestre hace que sea el principal reflector de la radiación solar incidente, incluso si tiene cubierta vegetal, influyendo en su reflectancia en función de la densidad y estado vegetativo de ésta.

Conociendo la reflectancia de los suelos, podremos caracterizarlos en función de su estado y propiedades.

Sus principales componentes son los sólidos inorgánicos, materia orgánica, aire y agua. El componente inorgánico o fracción mineral contiene fundamentalmente minerales cristalinos, la materia orgánica consta de raíces, restos vegetales y organismos vivos del suelo, rellenándose de aire y agua los espacios vacíos entre materiales sólidos en proporción variable, dependiendo de sus características y estado.

La reflectancia espectral de los suelos está condicionada por seis variables fundamentales:

- ❖ Contenido en humedad.
 - ❖ Contenido en materia orgánica.
 - ❖ Distribución y tamaño de las partículas.
 - ❖ Contenido en óxido de hierro.
 - ❖ Mineralogía del suelo.
 - ❖ Estructura del suelo.
- ❖ *Influencia de los componentes del suelo sobre la reflectancia:*

La humedad es la causante de que los suelos más oscuros sean los que más cantidad de agua tienen, debido a las reflexiones múltiples de la radiación en el interior de la fina película de agua que cubre las partículas, patente en una disminución de la reflectancia del visible – banda de absorción –. Esta banda de absorción será tanto más estrecha y profunda cuanto más localizada se encuentre el agua en el suelo – suelos arcillosos – y más ancha y poco profunda cuanto más deslocalizada esté – suelos arenosos –.

La materia orgánica influye en la reflectancia del suelo dependiendo de la forma y cantidad en la que ésta se encuentra, llegando a enmascararlo si su presencia es mayor al 2%. A mayor estado de descomposición, menor reflectancia.

En general, la reflectancia es inversamente proporcional al diámetro de la partícula. Hay que considerar, no solo el tamaño de la misma, sino también la forma y el tamaño de los agregados. El contenido de hierro influye de forma inversamente proporcional en la reflectancia en el visible.

Respecto a la parte mineral del suelo, influyen en las características espectrales debido a sus estructuras cristalinas. Los suelos de mineralogía gípsica presentan en todo el espectro la mayor reflectancia, los caoliniticos tienen una banda de absorción ancha en torno a las 0.9 μm .

❖ *Influencia del estado superficial del suelo.*

El estado de la rugosidad de la superficie del suelo puede afectar a su reflectancia. Cuanto mayor sea, más se dispersa la radiación y presentará menos reflectividad, al tiempo que se producen sombras de las partículas. Por ejemplo, en los suelos recién labrados, donde hay más rugosidad y humedad, hay una disminución de la reflectancia.

La cubierta superficial condiciona la respuesta espectral del suelo subyacente debido a las distintas características espectrales de suelos y plantas. Por lo general, para coberturas vegetales de un suelo inferiores al 15%, se asemeja al suelo desnudo en tanto que si es mayor del 40%, la respuesta se parece más a la de vegetación. No obstante, las propiedades de la vegetación están condicionadas por el tipo y estado del suelo subyacente y esto permite una estimación indirecta de sus propiedades.

En general el subsuelo condiciona las características superficiales de los suelos. Los que mejor drenaje tienen, presentan una mayor reflectancia. Si el suelo está erosionado, se observarán cambios de color correspondientes a los horizontes inferiores.

Características espectrales de la vegetación.

La complejidad del estudio de las propiedades ópticas de las cubiertas vegetales radica, no solo en las características propias de los vegetales, sino también de condicionantes ajenos a ellas, tales como la elevación solar, geometría de la cubierta, condiciones, atmosféricas, posición del sensor, color del suelo, orientación de las líneas de cultivo, etc.

❖ *Influencia de los componentes de las cubiertas vegetales.*

La curva de reflectancia de las hojas vegetales tienen una forma parecida presentando una forma característica en cada una de las regiones del visible, IR próximo e IR medio.

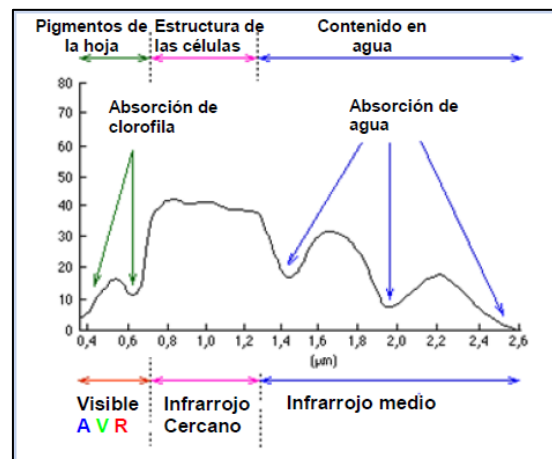


Figura 9.5 – Comportamiento de la vegetación respecto la reflectancia.

En el intervalo del visible [$0,4 \mu\text{m} - 0,7 \mu\text{m}$] la reflectancia de la hoja es baja, presentando bandas de absorción en el rojo y azul debidas a los pigmentos – principalmente clorofila a y b –, resultando un máximo en el verde que explica el color de las hojas.

En el intervalo del IR próximo [$0,7 \mu\text{m} - 1,3 \mu\text{m}$], la reflectancia es muy alta, formando una meseta debida a la estructura anatómica de la hoja.

En el intervalo del IR medio [$1,3 \mu\text{m} - 2,5 \mu\text{m}$] aparecen fuertes bandas de absorción en función del contenido del agua.

La reflectancia difusa de las hojas depende de la longitud de onda y de su estructura interna, pigmentación y contenido de agua, mientras que la especular se debe a la cutícula de la hoja.

Las propiedades ópticas de las hojas dependen también de su estado en la fase juvenil y senescencia. Fuera de estos estados, las propiedades de plantas anuales o de árboles caducifolios permanecen constantes, al contrario que las hojas aciculares de las coníferas, pues varían por el aumento de clorofila que se produce de año en año. En el caso de los árboles, además, se consideran las piñas – en coníferas – y la corteza.

El período de senescencia de la hoja se caracteriza por la desaparición de clorofila y aparición de pigmentos marrones, aumentando reflectancia en el amarillo/verde y del rojo. En el IR próximo sólo varía la reflectancia al secarse la hoja y cambiar su estructura interna. En el IR medio se asocia el aumento de reflectancia al secado de la hoja – disminución del contenido de agua –.

El estado nutritivo o enfermedades y plagas pueden hacer variar la cantidad de clorofila o hacer que aparezcan nuevos pigmentos, alterando la reflectancia. En ciertos cultivos anuales con presencia de flores – colza, girasol –, o incluso praderas y pastizales primaverales, presentan una respuesta espectral alterada por dichas flores.

❖ Reflectancia de las cubiertas vegetales.

La reflectancia de las cubiertas vegetales está ligada no sólo a la de las propias hojas, sino también a la del suelo subyacente. La influencia de éste último es menor con el crecimiento de las plantas, disminuyendo la reflectancia del VNIR y aumentando la del NIR. Por ello, es interesante determinar el LAI – *Leaf Area of Index* –, que indica el total de superficie de hojas por unidad de superficie del terreno.

En el caso de una cubierta forestal, la reflectancia es la combinación de la de los árboles y la del suelo, que a su vez está influido por un estrato herbáceo y uno arbustivo, pudiendo prevalecer la reflectancia de éstos últimos si hay poco arbolado.

❖ Influencia de la elevación solar.

El motivo de esta influencia se debe a que los rayos iluminan desigualmente la cubierta según su inclinación, generando zonas de sombra y de luz, tanto en la variación de la elevación solar a lo largo del día como a lo largo del año.

En el caso de cubiertas vegetales cuyas características no cambien de aspecto a lo largo del año – bosques de coníferas, suelo desnudo, rocas... – la variación de reflectancia se produce por la variación anual de la elevación del Sol. Si las cubiertas son de tipo anual, el cambio de reflectancia bidireccional obedece, no sólo a la elevación solar, sino a cambios de la propia cubierta, siendo difícil distinguirlos.

Características espectrales del agua.

El agua absorbe o transmite la mayor parte de la radiación visible que recibe. Por ello, su firma espectral es parecida a la de los suelos, pero en sentido contrario. A mayor longitud de onda, se produce mayor absorción. Su máxima reflectancia – agua clara – está en el azul, desapareciendo prácticamente en el infrarrojo.

El comportamiento del agua depende de la profundidad, de materiales en suspensión (arcillas, clorofila y nutrientes) y rugosidad de la superficie.

Los materiales del fondo influyen en la reflectancia y está relacionado con la profundidad. Como la absorción aumenta con la profundidad, las aguas poco profundas presentan mayor reflectancia.

El contenido de clorofila hace que descienda la reflectancia en torno al azul, presentando un aumento en el verde, siendo muy útil para localizar concentraciones de algas.

Los materiales en suspensión contribuyen a la turbidez del agua, aumentando al tiempo la reflectancia. La rugosidad de la superficie hace que ésta se comporte de forma difusa, dando mayor reflectancia. Las aguas tranquilas se comportan, respecto a la reflexión, de forma especular, dependiendo la reflectancia de la posición del sensor.

9.1.2 SENSORES

Tipos de sensores.

La teledetección se realiza a través de los sensores, detectando la señal electromagnética – reflejada o emitida – que llega de la Tierra y la atmósfera. Convierten la señal en un formato analógico (fotografía) o digital (imagen). Estos sensores se ubican en plataformas: satélites, aviones, grúas, globos...

Su clasificación puede hacerse desde distintos puntos de vista:

❖ Según el origen de la señal captada y las técnicas de teledetección:

- Sensores Pasivos: Sensores que registran la radiación emitida o reflejada por el sistema observado. Trabajan en todo el rango espectral. Ejemplos: las cámaras de fotos, los radiómetros y los sistemas de video.
- Sensores Activos: Sensores que cumplen la doble función de producir una señal de características conocidas que interactúa con el sistema observado y que será registrada tras su retorno. La información procede de la comparación entre radiación emitida y reflejada. Trabajan únicamente en el intervalo de las microondas. Ejemplos: el Radar y el LIDAR.

❖ Según la región del espectro en que trabajan:

- Técnicas en el VNIR: Sensores que miden la intensidad de la radiación solar reflejada por la Tierra en el intervalo espectral de 0.4 a 2.5 μm .
- Técnicas en el TIR: Registran la radiación emitida por el sistema radiante en el intervalo espectral de 3 a 5 μm y de 8 a 14 μm .
- Técnicas en las microondas: miden la intensidad y polarización de las ondas centimétricas entre 0.1 y 100 cm

❖ Según la forma de registrar la señal:

- Registro casi instantáneo: Permiten la adquisición casi instantánea del conjunto de la escena observada, como las cámaras fotográficas y cámaras electromagnéticas de barrido – *Return Beam Vidicom* –.
- Registro secuencial: Ofrecen una adquisición secuencial de elementos de la imagen con los que dato a dato se constituye el conjunto de la escena.

Los radiómetros multispectrales son sensores óptico-electrónicos que registran la radiación reflejada y emitida por la superficie terrestre y la separan en distintas bandas espectrales por medio de prismas, espejos dicróicos o filtros.

Adquieren la información de la superficie terrestre de forma secuencial, a intervalos regulares de forma que cada medida corresponde a un ángulo de visión llamado IFOV – *Instantaneous Field Of View* – o “campo de visión instantáneo”. La radiación es detectada por una serie de

detectores sensibles a diferentes longitudes de onda, transformándola en impulsos eléctricos proporcionales a la intensidad de la radiación recibida. La señal correspondiente a un IFOV se traduce en un dato numérico – dígito – que en la imagen corresponde a un píxel, obteniendo una imagen multiespectral.

Existen dos tipos fundamentales de radiómetros:

- ❖ Exploradores o radiómetros de barrido transversal por espejo oscilante [*across trackscanners*]: Adquieren información en una serie de líneas procedentes de estrechas franjas de terreno transversales a la dirección de avance de la plataforma. En cada barrido, la radiación recibida es muestreada de un lado a otro del sensor mediante un espejo rotatorio. Según avanza la plataforma, los barridos van conformando una imagen bidimensional de la superficie terrestre. Una línea de barrido equivale a una línea de píxeles de la imagen.

El rango espectral es de 0.3 a 14 μm . La radiación es separada por prismas o espejos y se convierte en señales eléctricas mediante fotodetectores. Para evitar el cambio de respuesta del sensor, los detectores se calibran. Conociendo los coeficientes de calibrado del sensor y las condiciones de adquisiciones, los valores digitales de la imagen pueden traducirse en términos de radiancia y, a partir de ésta, calcular magnitudes físicas como la reflectividad o la temperatura del sistema observado.

La resolución espacial del píxel viene condicionada por el IFOV y el “campo de visión angular total” – FOV – del espejo oscilante determinando también la amplitud de la franja de barrido – *swath* – y la anchura de la imagen. El IFOV en teledetección espacial está en valores en torno a 10° - 20°.

Este sistema es utilizado en misiones como LANDSAT, TIROS – NOAA, NIMBUS, entre otras.

- ❖ Exploradores o radiómetros de empuje [*along trackscanners or pushbroom scanners*]: Llevan una cadena lineal de detectores que cubre todo el campo de visión angular del sensor y se desplaza a lo largo de la trayectoria. Los detectores son CCD scanners [Charge Couple Device] ligados para actuar como electrodos.

En cada instante se registra información de una línea completa generando, al avanzar el sensor, una imagen bidimensional de la superficie terrestre.

Al prescindir de la parte móvil del espejo, son más fiables y duraderos. Permiten ver y medir por más tiempo la radiación, registrando mejor la señal y mejorando la resolución radiométrica.

El aumento de tiempo de observación disminuye el IFOV y permite utilizar bandas espectrales más estrechas. Se mejora, por tanto, la resolución espacial y espectral.

Característica de los sensores:

Si bien en fotografía tiene sentido hablar de escala, en imágenes espaciales y aeroportadas se habla de resolución. Se define la resolución de un sensor como su habilidad para registrar y discriminar información de detalle. Se contemplan 4 tipos de resolución: espacial, espectral, radiométrica, temporal; y, recientemente, también angular.

- ❖ **Resolución espacial:** La resolución espacial de un sensor está determinada por el IFOV, que es la sección angular medida en radianes, observada en un instante. La distancia sobre el terreno del IFOV es la unidad mínima de la imagen y corresponde al tamaño medio del píxel. Esta resolución depende de factores como la altitud orbital o de vuelo, velocidad de exploración y número de detectores.
Indica el tamaño mínimo de los objetos que se pueden discriminar, pero también puede registrar objetos de tamaño inferior al píxel debido a la influencia de otros factores, como la geometría, contraste de radiancia entre objetos próximos o la claridad de la atmósfera.
- ❖ **Resolución espectral:** La resolución espectral de un sensor expresa su aptitud para separar señales de distinta longitud de onda y depende del filtro óptico que las separa en bandas.
Indica el número y anchura de las bandas espectrales en que un sensor registra la radiación. Cuanto mayor número y más estrechas sean, mayor es la capacidad del sensor para reproducir la respuesta espectral del objeto observado, pudiendo discriminar unas coberturas de otras.
- ❖ **Resolución radiométrica:** La resolución radiométrica se refiere a la sensibilidad de un sensor y expresa su aptitud en una banda espectral dada para diferenciar señales electromagnéticas de energía diferente.
Está condicionada por los intervalos de digitalización de la señal. El número máximo de niveles digitales de la imagen – rango dinámico – suele identificarse con la resolución radiométrica y oscila entre 64 [6bit], 128 [7 bit], 256 [8 bit] y 1024 [10 bit].
A mayor número de niveles, mayor resolución radiométrica y mejor será la información.
- ❖ **Resolución temporal:** La resolución temporal es la frecuencia de cobertura del sensor, es decir, la periodicidad con que adquiere imágenes de la misma zona. Esto es función de las características orbitales de la plataforma – altura, velocidad, inclinación –, así como del diseño del sensor – ángulo de observación y abertura –.
Los satélites meteorológicos son los de más alta resolución temporal, ofreciendo imágenes cada 30 minutos, como MeteoSat, o cada 12 horas como NOAA.
En el caso de un vuelo aeroportado no se habla de resolución temporal como tal, sino más bien, de intervalo y datación de adquisición de la información.

9.1.3 SENSOR DAEDALUS – 1268 ATM.

Gran parte de la información aportada sobre el trabajo realizado por este sensor se describe en el pre-proceso de la imagen que ha aportado, sobre la cual versa el presente proyecto.

Las siglas de ATM vienen del inglés *Airborne Thematic Mapper*. El sensor DS – 1268 es un escáner multiespectral pasivo creado para plataformas aeronáuticas de montaje (aviones, avionetas...). Ofrece 11 bandas de longitudes de onda de posición fija en los rangos de espectro visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio e infrarrojo térmico, y una doceava banda de confianza para el infrarrojo térmico. Fue comprado por NERC – siglas en inglés de *North American Electric Reliability Corporations*, que en español se traduce como Corporaciones de Seguridad Eléctrica de América del Norte – en 1993.

La NERC ARSF – siglas en inglés de *NERC Airborne Research and Survey Facility* – ha comercializado dos instrumentos ATM desde 1982 hasta la actualidad, de los cuales el DS – 1268 fue el primer producto y estuvo operativo desde 1982 hasta 1998. El actual es el Azimuth Systems AZ – 16, una versión actualizada del DS – 1268.

Características del sensor

La resolución espacial del suelo que genera el sensor ATM se define a partir de las características ópticas de la cabeza del sensor – que proporciona el IFOV – y la altitud de la aeronave en el nadir que se requiera. Como ya se ha explicado en el apartado 4.6.4, aunque el ancho y en largo del pixel se obtienen a partir de la altura en el nadir y el IFOV, se debe considerar que las dimensiones reales en la superficie variarán a mayor distancia del nadir y se hacen influyentes el teledetección aeroportada con sensores de amplia configuración de IFOV, por lo que puede ser calculada en combinación con la salida de la información de navegación que se subministra con los datos.

Los parámetros de la cabeza del sensor se describen en la figura 9.6

	Daedalus 1268	AZ-16
Operational period	1982-1985	1996-present
IFOV	2.5 mrad	2.5 mrad
Pixel swath	716	992/1984
Digitised FOV	86 °	90 °
S-bend correction	73 °	
Scan rate	12.5, 25, 50 Hz	12.5, 25, 50 Hz
Roll correction	+/-15 °	
Resolution	8-bit (0-255)	16-bit (0-65535)
Thermal channel calibration	Two black bodies	

Figura 9.6 – Especificaciones del sensor DS – 1268
y su actual predecesor.

El producto que ofrece el sensor es un producto de datos *en crudo*, en las dimensiones que el usuario desee y el formato en que necesite.

El producto de datos sobre resolución espectral de 8 bits tendrá nivel de corrección 0, es decir:

- ❖ Los datos no tendrán corrección radiométrica.

- ❖ El producto no se aporta con datos integrados de posición y altitud.
- ❖ El producto no tendrá corrección geométrica.

Los niveles de corrección se hacen posteriormente desde laboratorios de teledetección y/o por el usuario que opere con el producto final.

La naturaleza aeroportada del sensor conlleva que las características orbitales de sensores espaciales conocidas se conviertan parámetros mejor comprensibles desde un campo más relativo a la fotogrametría. La plataforma sobre la que va es un avión, por consiguiente, la posición del sensor en todo momento para la determinación de correcciones de deformaciones de la imagen en momento real y posterior a su registro, se determina a partir de sistemas inerciales instalados en el avión sobre el que sea montado.

Disponibilidad de datos.

La disponibilidad de los datos aportados es propiedad del organismo NEOCD – siglas en inglés de NERC *Earth Observation Data Centre*, o “Centro de Datos de Observación Terrestre del NERC” en español –. Este organismo posee todo el archivo de datos ATM adquiridos por ambos sensores en las distintas épocas 1995, 1996, 1997, 1998, 2001.

Están disponibles mediante descarga libre para los usuarios de la organización adscritos a su página web. Como todos los datos de la ARSF, éstos se restringen inicialmente al equipo del llamado proyecto PI por un período de alta de un año, durante el cual otros usuarios pueden acceder a los datos solo bajo el permiso del proyecto original PI. Después del período, los datos se convierten en disponibles para el resto de la comunidad.

Bandas espectrales y resolución espacial.

Este sensor tiene la característica particular de que todas las bandas registran información con la misma resolución espacial, la cual será elevada según la combinación entre IFOV, velocidad y altura de vuelo a la que se registre la imagen. Esta configuración espacial elimina como tal el concepto de fusión de bandas en el trabajo de gabinete, necesario para obtención de información temática con el mayor detalle posible. Por consiguiente, el concepto de que la mayor resolución va ligada a la banda pancromática, cuyo registro antes necesario (dada la búsqueda de mejor resolución mediante ésta banda) desaparece.

El siguiente cuadro comparativo ilustra las aplicaciones por bandas que aporta el sensor. Las bandas descritas en color azul son las que se han configurado como las del sensor TM de la plataforma LANDSAT – 5, dando lugar a la ya conocida imagen ATM. Los valores, expresados en nanómetros, representan los límites de longitudes de onda a los que es sensible cada banda espectral.

BANDA	LONGITUD DE ONDA	APLICACIONES
1	420 – 450 Violeta	Observación de minerales y composición química de los suelos, detección de materiales por baja emisión fluorescente, análisis orgánico de masas líquidas por determinación de absorción.
2	450 – 520 Azul	Discriminación de suelo y vegetación, mapas de batimetría, identificación de elementos culturales y urbanos, calidad del agua.
3	520 – 600 Verde	Mapas de vegetación verde – medidas del pico de reflectancia –, identificación de aspectos urbanos y culturales, calidad del agua.
4	600 – 620 Rojo	Discriminación litológica de la corteza terrestre, absorción de la cubierta vegetal.
5	630 – 690 Rojo	Áreas vegetadas y no vegetadas, discriminación de especies vegetales por absorción de clorofila, elementos culturales y urbanos.
6	690 – 750 Infrarrojo Próximo	Composición celular de la vegetación, composición nutricional (proteínica y vitamínica) de los cereales.
7	760 – 900 Infrarrojo Próximo	Estimación del vigor de vegetación y biomasa, identificación de tipos de cultivos y vegetación, delimitación de cuerpos de agua y humedad del suelo.
8	910 – 1050 Infrarrojo Próximo	Densidad de los cuerpos vegetales, análisis del estrés hídrico en las masas vegetales.
9	1550 – 1750 Infrarrojo Medio	Indicativa de la cantidad de humedad en las plantas y suelo. Se distingue entre nieve y nubes.
10	2080 – 2350 Infrarrojo Medio	Discriminación de minerales y tipos de rocas, mapas hidrotermales, contenido de humedad en la vegetación.
11	8500 – 13000 Infrarrojo Térmico	Discriminación de estrés en las plantas, humedad del suelo por radiación térmica, mapas térmicos (urbano, agua).
12	8500 – 13000 Infrarrojo Térmico	Registro térmico para contraste de datos y comprobación de resultados de la banda ATM11.

Finalmente, se aportan 3 diagramas de anchos de banda del sensor, siendo cada uno una comparativa de éste con los sensores más comunes.

- ❖ El primer diagrama de ancho de banda abarca el rango óptico de registro de los sensores que va desde el visible hasta el infrarrojo cercano.

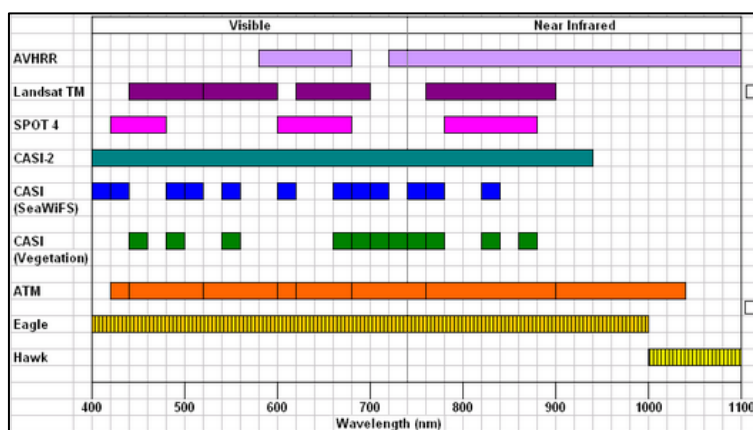


Figura 9.7 – Comparaciones de ancho de banda para el rango VNIR.

- ❖ El segundo diagrama de ancho de banda abarca el rango óptico de registro de los sensores correspondiente a la parte de λ más pequeñas del infrarrojo de onda corta o medio.

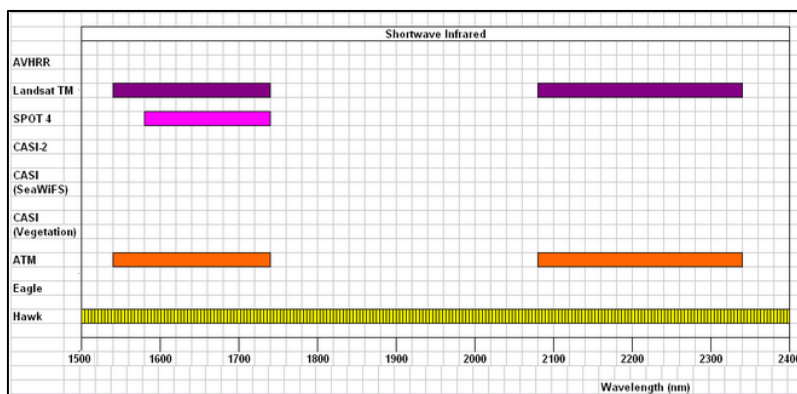


Figura 9.8 – Comparaciones de ancho de banda para parte del rango SWIR.

- ❖ El tercer diagrama de ancho de banda abarca los rangos ópticos de registro de los sensores correspondientes a la parte de λ más amplias del infrarrojo medio y al infrarrojo térmico.

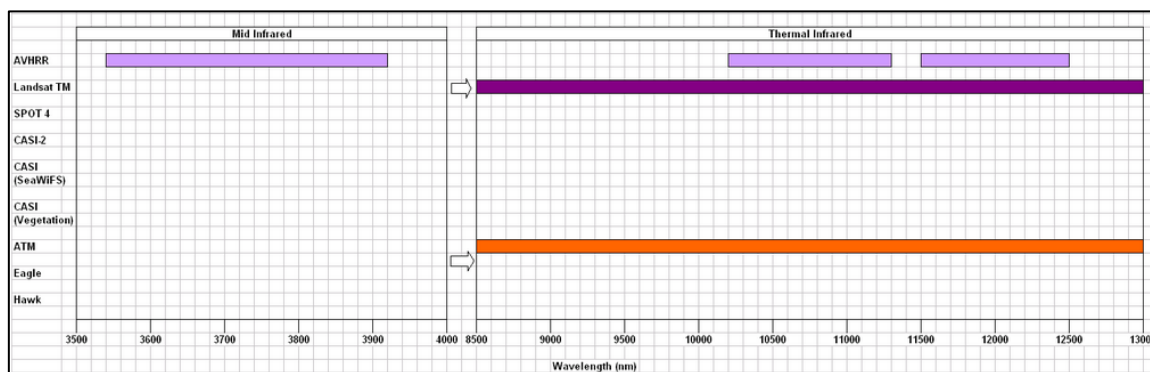


Figura 9.9 – Comparaciones de ancho de banda para parte del rango SWIR y para el rango TIR.

9.2 ANEXO II

9.2.1 SOBRE LA ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL

Concepto y tipos de Resolución Espacial

Es esencial recalcar la importancia del concepto de resolución espacial, puesto que es la base de la confección de cartografía bajo una determinada escala y con un grado de confianza requeridos. El objetivo de este anexo es abrir un campo de posibilidades de adquisición de imágenes de muy alta resolución espacial, con información de las características de cada sensor y la disponibilidad económica por imagen, para confecciones cartográficas a escalas grandes

El número de píxeles que integran las imágenes que ofrecerá un sensor en teledetección definen su poder de resolución o la capacidad de discernir objetos/detalles de un determinado tamaño en las imágenes captadas. Así, a mayor número de píxeles por unidad de superficie, mayor resolución del fotosensor. Esta razón inicial es lo que conocemos por *Resolución Espacial*.

Como ya es sabido, la resolución espacial para un sensor satelital es prácticamente un parámetro fijado por cada banda del sensor a partir de los parámetros orbitales establecidos para el mismo – siempre y cuando el campo de visión no sea grande –, y un parámetro variable en función del campo de visión instantáneo del sensor y la altura a la que vuela el transporte aéreo sobre el que esté montado un sensor aeroportado.

Cuanto mayor sea la resolución espacial, más pequeños serán los objetos que se puedan distinguir en la superficie y mayor será la escala del mapa, y viceversa. Partiendo de esta base, actualmente se distingue entre cuatro tipos de resolución espacial:

- Muy baja resolución espacial: La cual tienen aquellos sensores cuyas imágenes sean capaces de discriminar objetos sobre la superficie terrestre de hasta 1000 y 2500 m de tamaño. Ofrecen finalidades temáticas como análisis generalizado de la vegetación a niveles regionales y continentales, estudios medioambientales, estudios meteorológicos, etc.
- Baja resolución espacial: La que ofrecen sensores cuyas imágenes son capaces de discriminar objetos sobre la superficie terrestre de dimensión variable entre 100 y 200 m. Las escenas con esta propiedad se destinan, por ejemplo, a cartografías regionales con temática de estructuras geológicas, a análisis de la salud fitosanitaria de zonas extensas.

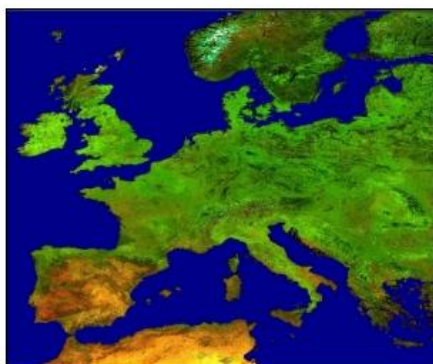


Figura 9.10 – Imagen de la vegetación del continente europeo a partir de una escena con 1 km de resolución.



Figura 9.11 – Imagen de la composición volcánica de Sicilia a partir de una escena con 188 m de resolución.

- Alta resolución espacial: La que aportan sensores cuyas imágenes permiten discernir detalles de entre 10 y 30 metros. Muchos sensores de las plataformas más conocidas aportan imágenes en alta resolución, como por ejemplo LANDSAT y SPOT – que también aporta escenas en muy baja resolución –.

Las imágenes de esta naturaleza permiten localizaciones de grandes infraestructuras (por ejemplo, aeropuertos, instalaciones deportivas, ciudades...), cartografías de edificios, de carreteras o de terrenos agrícolas, estudios de vegetación de parcelas con extensión media, etc.

- Muy alta resolución espacial: La imagen ATM del proyecto entra en esta categoría. Ésta es la resolución que tienen imágenes capaces de distinguir objetos a partir de los 10 m hasta menos de 1 m (0.5 m, por ejemplo, de las escenas de la plataforma GEOEYE – 1).

Sobre estas imágenes se distinguen características de objetos del tamaño de un coche, permitiendo estudios del tipo “vegetación de pequeñas parcelas agrícolas, maduración o enfermedades de plantas”, distinción entre tipos de edificios, creación modelos digitales de elevación, etc.



Figura 9.12 – Imagen de Venecia a partir de una escena con 30 m de resolución.



Figura 9.13 – Imagen de la plataforma de lanzamiento de un transbordador en una escena de 1 m de resolución.

De los cuatro tipos presentados, la información que se aportará versa sobre muy alta resolución espacial. Un ejemplo es la precisión cartográfica que ofrece una imagen con resolución de 10 m: considerando el índice de percepción visual de un observador medio, se puede obtener cartografía a escala E: 1/50000, siendo la propia resolución de la imagen, el mayor error máximo de posicionamiento. Entonces afirma que, a mayor es la resolución espacial, menor es el error de posicionamiento y el producto final de ortoimagen tiene mayor escala. Traducido en ventajas, esto supone la posibilidad de creación de mapas base más detallados con menor presupuesto económico, mejor distinción de usos del suelo, análisis de fenómenos terrestres con enfoques más locales, etc.

Actualmente, entre las mejores resoluciones y espectrales de un sensor con libre distribución de imágenes, se encuentra la plataforma LANDSAT – 8. Se citan a continuación algunos de los sensores con distribución de imágenes de alta resolución espacial, tanto por descarga libre como por compra de datos por niveles de calidad, y las plataformas correspondientes. Para sensores cuyas escenas se adquieren por pago, se indican precios aproximados, debido a que éstos varían porque las escenas se entregan en función de la corrección con la que se desea adquirirlas y en función de que se las escenas se deseen pedir por adelantado a una fecha determinada o que ya hayan sido registradas en fechas anteriores:

- ❖ **EO – 1**
Sensor multispectral ALI de 10 bandas, una banda pancromática que tiene 10 m de resolución espacial y las 9 bandas restantes que tienen 30 m de resolución espacial. La adquisición de escenas es gratuita y se distribuye desde los servidores GLOVIS y Earth Explorer.
- ❖ **EROS – B**
Sensor de una banda CCD – TDI, pancromática, de 0.7 m resolución espacial en la vertical y adquisición de escenas por pago. Precio aproximado por escena, sin corregir, de 18 \$/Km².
- ❖ **FORMOSAT – 2**
Sensor multispectral FORMOSAT – 2 de 5 bandas, una banda pancromática que tiene 2 m de resolución espacial y las restantes bandas que tienen 8 m de resolución espacial, adquisición de escenas por pago. Precio aproximado por escena, con corrección de datos, de 6.08 €/km².
- ❖ **GEOEYE – 1**
Sensor multispectral GEOEYE – 1 de 5 bandas, una pancromática que tiene 0.41 m de resolución espacial en la vertical y 0.5 m en los extremos de las escenas resultantes, y las restantes que tienen 1.64 m en la vertical y 2 m en los extremos. Adquisición de escenas por pago. Precio mínimo por escena de 25 \$/Km².
- ❖ **IKONOS**
Sensor multispectral IKONOS de 5 bandas, una banda pancromática que tiene 0.82 m de resolución espacial en la vertical y 1 m de resolución espacial en los extremos de las escenas resultantes y las restantes bandas que tienen 3.28 m en la vertical y 4 m en los extremos. Adquisición de escenas por pago. Precio mínimo por escena de 20 \$/km².
- ❖ **KOMPSAT – 2**
Sensor multispectral KOMPSAT – 2 de 5 bandas, una banda pancromática que tiene 1 m de resolución espacial en la vertical, y las restantes bandas que tienen 4 m en la vertical. Adquisición de escenas por pago. Precio mínimo por escena de 15 \$/km² para imágenes de nueva adquisición, y de 7.5 \$/km² para imágenes de archivo.
- ❖ **ORBVIEW – 3**
Sensor multispectral del mismo nombre que la plataforma con 5 bandas, una banda que registra escenas en pancromático con una resolución espacial de 1 m, y las restantes que registran con 4 m. La adquisición de escenas es gratuita y se distribuye desde el servidor Earth Explorer.
- ❖ **QUICKBIRD**
Sensor multispectral QUICKBIRD de 5 bandas, una banda pancromática que tiene 0.61 m de resolución espacial en la vertical y 0.85 m de resolución espacial en los extremos de las escenas resultantes, y las restantes bandas que tienen 2.44 m en la vertical y 2.88 m en los extremos. Adquisición de escenas por pago. Precio mínimo por escena de 20 \$/km².

❖ RAPIDEYE

Sensor multiespectral RAPIDEYE de 5 bandas, todas con 0.61 m de resolución espacial. Adquisición de escenas por pago. Precio mínimo por escena de 0.95 €/km².

❖ RESOURCESAT – 2

Sensor multiespectral LISS – IV de 4 bandas, todas con 5.8 m de resolución espacial. Adquisición de escenas por pago. Precio aproximado por escena de 0.82 €/km².

❖ SPOT – 5

Dos sensores. Uno es HRG, que es multiespectral de 5 bandas, de las cuales la pancromática puede registrar datos con 2.5 m o con 5 m de resolución espacial, mientras las restantes lo hacen con 10 m. Otro es HRS, que tiene una sola banda, pancromática y con 10 m de resolución espacial. Adquisición de escenas por pago. Precio mínimo aproximado por escena de 0.75 €/km².

❖ SPOT – 6/SPOT – 7

Lanzados recientemente en el tercer trimestre de 2012 y el primer trimestre de 2014, ambos satélites tienen sensores multiespectrales de 5 bandas, una en canal multiespectral que ofrece 1.5 m de resolución espacial, y las restantes que ofrecen 6m. Adquisición de las escenas por pago y precios variables según la petición de la calidad del producto.

❖ PLEIADES

Dos sensores PLEIADES 1 – A y PLEIADES 1 – B, distribuidos en un satélite con el mismo nombre del sensor, que funcionan conjuntamente registrando escenas como un solo satélite. Ambos sensores son multiespectrales de 5 bandas, una banda pancromática que registra escenas con 0.5 m de resolución espacial en la vertical y con 0.7 m en los extremos, y los restantes canales con 2 m en la vertical y 2.8 m en los extremos. Adquisición de las escenas por pago. Precio mínimo aproximado por escena de 0.75 €/km².

❖ THEOS

Sensor multiespectral THEOS de 5 bandas, una pancromática que tiene 2 m de resolución espacial en la vertical, y las restantes bandas que tienen 15 m en la vertical. Adquisición de escenas por pago. Precio mínimo por escena a registrar de 0.2 \$/km².

❖ WORLDVIEW – 2

Sensor multiespectral WORLDVIEW – 2 de 9 bandas, una que es pancromática tiene 0.46 m de resolución espacial en la vertical y 0.52 m en los extremos de la escena resultante, y las restantes bandas que tienen 1.84 m en la vertical y 2.08 en los extremos. Adquisición de las escenas por pago. Precio mínimo por escena a registrar desde 9.52 \$/km² hasta 35 \$/km².



10. PRESUPUESTO

10.1. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

A continuación, se muestra el cálculo del coste económico que supone el proyecto realizado, asignando unos valores presupuestarios aproximados a cada una de las acciones y elementos que han intervenido en la elaboración.

HOJA DE PRECIOS:

1. Costes instrumentales.

- ❖ Ordenador e impresora:
 - Compra en total: 1500 €
 - Amortización en 6 meses: $1500/132 = 11.36$ €/día.
 - **Total: 8.34 € / día.**
- ❖ Programa ERDAS IMAGINE, 2011:
 - Compra de licencia: 4800 €
 - Amortización en 2 años: $4800/522 = 9.20$ €/día.
 - **Total: 9.20 € / día.**
- ❖ Programa ENVI versión 4.8:
 - Compra de licencia: 2700 €
 - Amortización en 1 año: $2700/261 = 10.35$ €/día.
 - **Total: 10.35 € / día.**
- ❖ Paquete Microsoft Office 2007 para Windows 7:
 - Compra de licencia: 130 €
 - Amortización en 1 año: 0,50 €/día.
 - **Total: 0.50 € / día.**

2. Costes personales.

- ❖ Ingeniero técnico en topografía:
 - **Total: 103.8 € / día.**

PRESUPUESTO POR CAPÍTULO

Cada capítulo sobre el que se muestra el presupuesto a continuación, es una agrupación de apartados de la presente memoria.

Capítulo I: Documentación

- Búsqueda de información: Trece días.

Concepto	Nº de Unidades:	€/ud	Presupuesto (€)
ITT. Topografía	1	103,80	1349,40
Ordenador	1	8,34	108,42
Paquete de Office	1	0,50	6,50
		Total	1464,32

Capítulo II: Pre – proceso de imagen

- Tratamiento de la imagen necesario para la realización de la ortoimagen. Dos días.

Concepto	Nº de Unidades	€/ud	Presupuesto (€)
ITT. Topografía	1	103,80	207,60
Ordenador	1	8,34	16,68
Programa ENVI 4.8	1	10,35	20,70
Programa ERDAS IMG.	1	9,20	18,40
		Total	263,38

Capítulo III: Clasificación y análisis

- Selección de las áreas de entrenamiento y procesado de la imagen. Cinco días.

Concepto	Nº de Unidades	€/ud	Presupuesto (€)
ITT. Topografía	1	103,80	519,00
Ordenador	1	8,34	41,70
Programa ERDAS IMG.	1	9,20	46,00
		Total	606,70

Capítulo IV – Cartografía

- Análisis en soporte papel y digital de los resultados. Seis días.

Concepto	Nº de Unidades	€/ud	Presupuesto (€)
ITT. Topografía	1	103,80	622,80
Ordenador	1	8,34	50,04
Programa ERDAS IMG.	1	9,20	55,20
		Total	728,04

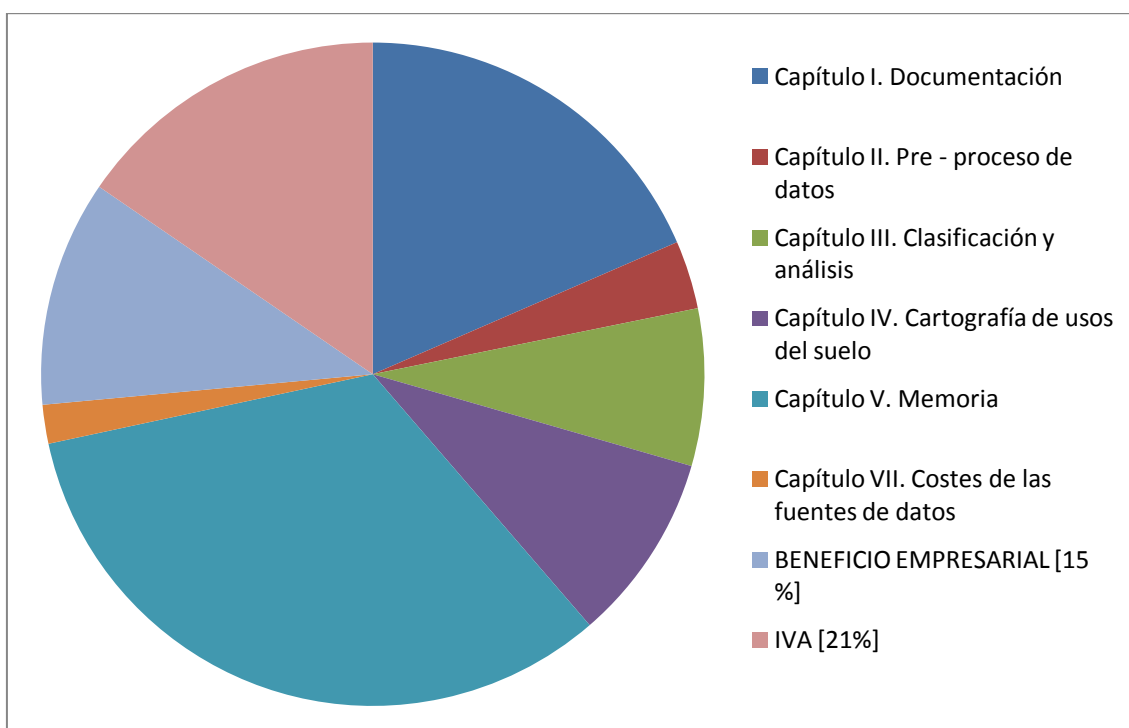
Capítulo V – Memoria

- Descripción e impresión del trabajo realizado. Veinte días.

Concepto	Nº de Unidades	€/ud	Presupuesto (€)
ITT. Topografía	1	103,80	2076,00
Ordenador	1	8,34	166,80
Impresora	1	9,00	180,00
Paquete de Office	1	0,50	10,00
Materiales Varios	1	9,00	180,00
		Total	2612,80

RESUMEN GENERAL DEL PRESUPUESTO

Concepto	Coste (€)
Capítulo I. Documentación	1464,32
Capítulo II. Pre - proceso de datos	263,38
Capítulo III. Clasificación y análisis	606,70
Capítulo IV. Cartografía de usos del suelo	728,04
Capítulo V. Memoria	2612,80
Capítulo VII. Costes de las fuentes de datos	150,00
TOTAL DE LAS ACTIVIDADES	5825,24
BENEFICIO EMPRESARIAL [15 %]	873,79
IVA [21%]	1223,30
PRESUPUESTO FINAL	7922,33





11. CONCLUSIONES

11.1. CONCLUSIONES

En las conclusiones es necesario recalcar la importancia de la teledetección como un método de estudio, ya que permite conocer la zona de trabajo considerada sin necesidad de estar en ella, reduciendo los gastos derivados de la exploración.

Se ha mostrado como, mediante técnicas derivadas de teledetección, se puede establecer una determinada cobertura del suelo de la zona que se pretenda estudiar, valorando los elementos que componen dicha zona.

Cabe destacar que por ello es necesario seguir desarrollando simultáneamente los conocimientos de determinadas áreas de estudio con las aptitudes que se llevan a cabo en teledetección puesto que, como se ha planteado en el presente proyecto, el análisis de los usos del suelo está basado en la capacidad de fotointerpretación del operador basándose en los datos conocidos de la zona de estudio, y este planteamiento permite alimentar retroactivamente el proceso contrario. Es decir, se puede mejorar las bases para estudiar zonas desconocidas, obteniendo resultados que se corresponden a la realidad con mejor fiabilidad, a partir de análisis de detalle previos que se lleven a cabo en zonas conocidas con elementos similares.

Se muestran además, las nuevas ramas que se abren de ello. Un ejemplo es que, a partir de una clasificación de una imagen de archivo con buenos niveles de confianza, se podrán realizar temáticas dinámicas en el tiempo que permitan el estudio prolongado del desarrollo de la zona en cuestión, siempre con mejor presupuesto que por otros métodos de estudio.

Es de valorar, la cantidad de información disponible en la red. Programas de libre distribución como Google Earth y Earth Explorer y herramientas aplicadas a una determinada región, como Sig-Pac en España, son capaces de aportar muchísima información de forma rápida, eficaz y económica. Es importante tener en cuenta la bondad de esta información, pero es interesante su aportación como complemento de información.

El objetivo del presente Proyecto Fin de Carrera se ha logrado, pues se ha obtenido una cartografía base, aportando información necesaria para el análisis físico y para los trabajos de campo posteriores.

De cara al futuro este PFC se puede retomar, ampliándose en función de las necesidades y tecnologías para nuevos retos. Esto se aplica para la zona de estudio, para otras zonas a ser tratadas de la misma manera y para cualquier zona cuya información se haya registrado mediante imágenes de naturaleza aerotransportada.

En definitiva, el trabajo realizado forma parte del estudio previo de una zona de interés, que se considera puede resultar oportuno para empezar cualquier trabajo, y que puede ayudar en la fase de diseño y toma de decisiones.



12. BIBLIOGRAFÍA

12.1 BIBLIOGRAFÍA

- CCHS, CSIC (2011): Introducción a la Teledetección con ERDAS IMAGINE
- Chuvieco, E. (1996): Fundamentos de teledetección espacial, Rialp, Madrid.
- Gutiérrez, M.J., Fernández-Renau, A. y Gómez, J.A. (1994): Teledetección en el INTA y el uso de sensores aeroportados, *Jornadas Técnicas. Experiencias con sensores multiespectrales aerotransportados*.
- Manual ENVI 4.7 (2009): Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide.

12.2 PÁGINAS WEB

http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/i_resolucion.htm (Visitado el 13/12/2013)

http://www.limnetica.com/Limnetica/Limne16/L16u107_Thophic_state_airbone_imagery.pdf (Visitado el 11/02/2014)

<http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/satelites-resolucion-espacial.htm> (Visitado el 11/02/2014)

http://es.wikipedia.org/wiki/Parque_regional_del_Sureste (Visitado el 27/02/2014)

<http://es.wikipedia.org/wiki/Espa%C3%B1a#Geograf.C3.ADa> (Visitado el 27/02/2014)

<http://neuroc99.sld.cu/espana.htm> (Visitado el 27/02/2014)

http://es.wikipedia.org/wiki/Suelos_de_Espa%C3%B1a (Visitado el 27/02/2014)

<http://platea.pntic.mec.es/~jpascual/excursiones/Itinerario%20GeoMadrid%20Sureste.pdf> (Visitado el 15/03/2014)

<http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema07.pdf> (Visitado el 15/03/2014)

<http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/escala-resolucion-espacial.htm> (Visitado el 15/03/2014)

http://www.srgis.cl/pdf/guia_basica_imagenes_satelitales.pdf (Visitado el 15/03/2014)

<http://www.ign.es/ign/resources/acercaDe/aig/A2.pdf> (Visitado el 15/03/2014)



<http://www.madrimasd.org/cienciaysociedad/patrimonio/rutas/geologicas/ItinerariosGeologicos/itinerarioSur/ItinerarioSur.pdf> (Visitado el 03/04/2014)

http://geo.arc.nasa.gov/sge/jskiles/top-down/OTTER/OTTER_docs/DAEDALUS.html
(Visitado el 03/04/2014)

http://badc.nerc.ac.uk/view/neodc.nerc.ac.uk__ATOM__dpt_11637769049711549 (Visitado el 03/04/2014)

<http://web.pdx.edu/~emch/ip1/bandcombinations.html> (Visitado el 03/04/2014)

<http://platea.pntic.mec.es/~jpascual/excursiones/Itinerario%20GeoMadrid%20Sureste.pdfv>
(Visitado el 03/04/2014)

<http://arsf.nerc.ac.uk/instruments/atm.asp?cookieConsent=A> (Visitado el 04/04/2014)

http://coello.ujaen.es/Asignaturas/teledeteccion/tel/tel_tfc_archivos/Tema12.pdf (Visitado el 06/04/2014)

http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45518/componente45516.pdf (Visitado el 23/04/2014)

<http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/> (Visitado el 24/04/2014)

<https://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/3148/1/12-ruiz.pdf> (Visitado el 24/04/2014)

<http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/espectro.htm> (Visitado el 24/04/2014)

https://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/Flaash_Module.pdf (Visitado el 28/04/2014)

http://geospatial.intergraph.com/Libraries/Tech_Docs/ATCOR_Product_Description.sflb.ashx
(Visitado el 28/04/2014)

<http://books.google.es/books?id=t8ZLSpM20m8C&pg=PA11&dq=formatos+BIL+BIP+y+BSQ&hl=es&sa=X&ei=0-FnU-69OaKS7Aa9qYHoDA&ved=0CDQQ6AEwAA#v=onepage&q=formatos%20BIL%20BIP%20y%20BSQ&f=false> (Visitado el 05/05/2014)

<https://support.google.com/earth/answer/148110?hl=es> (Visitado el 29/05/2014)

http://www.nasdap.ejgv.euskadi.net/r50-7393/es/contenidos/informacion/sigpac/es_6713/sigpac.html (Visitado el 13/06/2014)